Manual Centroamericano para Diseño de Pavimentos









Agencia de los Estados Unidos para el Desarrollo Internacional



Secretaría de Integración Económica Centroamericana



Ing. Jorge Coronado Iturbide
Consultor

Noviembre de 2,002

MANUAL CENTROAMERICANO PARA DISEÑO DE PAVIMENTOS

La Secretaría de Integración Económica Centroamericana, me honró en la selección para el desarrollo del Estudio mencionado, presentándolo a continuación.

Este estudio fue desarrollado a través del convenio de donación USAID/SIECA No. 0596-0184.20, siendo parte del Programa “mejora de la capacidad de la región para mitigar los efectos transnacionales de desastres”, dando como componente final el “MANUAL CENTROAMERICANO PARA DISEÑO DE PAVIMENTOS”.

Responsable de la Consultoría:	Ing. Jorge Coronado Iturbide Consultor
Grupo de apoyo técnico	Ing. Rodrigo Rendón Estrada
Coordinación por parte de La SIECA	Lic. Ernesto Torres Chico Ing. Rafael Pérez Riera Ing. César Castillo Morales
Grupo de Revisores Regionales	Ing. Gustavo Morales, Guatemala Ing. Hans Alexis Tovar, El Salvador Ing. Ana Julia García, Honduras Ing. José A. Gutiérrez, Nicaragua Ing. Aníbal Sanabria, Costa Rica

Ing. Jorge Coronado Iturbide
Consultor

Guatemala, Noviembre de 2,002

INTRODUCCIÓN

Constituyendo el sistema de transporte la base primordial para desarrollar la integración tanto económica, como social y cultural y para fomentar la convivencia entre los habitantes de los países centroamericanos, será la red vial que los interconecta, el factor medular sostenible para tal fin.

La SECRETARÍA DE INTEGRACIÓN ECONÓMICA CENTROAMERICANA, SIECA, con visión integral, permanente y futurista de integración, procedió con el apoyo de la AGENCIA INTERNACIONAL PARA EL DESARROLLO DE LOS ESTADOS UNIDOS, USAID, a elaborar una serie de normas y manuales para: Planificar, Construir, Mejorar, Mantener y Fortalecer la red vial centroamericana, reduciendo su vulnerabilidad ante los desastres naturales.

Como parte de esos documentos, se presenta el **"MANUAL CENTROAMERICANO PARA DISEÑO DE PAVIMENTOS"** el cual coadyuvará a construir mejores y más durables superficies de rodaduras de las carreteras, para seguridad y comodidad de los usuarios, desafiando a las nuevas tecnologías de fabricación de equipo rodante, de las propiedades de los materiales y las inclemencias del tiempo.

CONTENIDO

CAPÍTULO 3
Análisis de Tránsito

CAPÍTULO 4
Evaluación de Subrasantes

CAPÍTULO 5
Elementos de la estructura de pavimento

CAPÍTULO 6
Drenajes

CAPÍTULO 7
Diseño de espesores

CAPÍTULO 8
Rehabilitación de pavimentos existentes

CAPITULO 9
Descripción de procedimientos analíticos, empíricos y mecanísticos, para diseño y evaluación de estructuras de pavimentos.

ÍNDICE DE TABLAS

Capítulo 6

Capítulo 7

ÍNDICE DE FIGURAS

ABREVIATURAS

AASHTO	American Associations of State Highway and Transportation Officials, o sea Asociación Americana de Autoridades Estatales de Carreteras y Transporte
ASTM	American Society for Testing Materials, o sea Sociedad Americana para el Ensayo de Materiales
CBR	California Bearing Ratio, o sea Valor Soporte California
cm	Centímetro
ESAL´s	Equivalent Axial Load, o sea Ejes Equivalentes
FWD	Falling Weigth Deflectometer, o sea Prueba de Deflexión por Peso
IP	Índice Plástico
IRI	International Roghnees Index o sea Indice Internacional de Rugosidad
Km	kilómetros
LEF	Load Equivalent Factor
LP	Límite Plástico
LL	Límite líquido
Mk	Módulo de Reacción
MCIV	Ministerio de Comunicaciones, Infraestructura y Vivienda, Guatemala
MOP	Ministerio de Obras Públicas, El Salvador
MOPT	Ministerio de Obras Públicas y Transporte, Costa Rica
Mr	Módulo de Resiliencia
MTI	Ministerio de Transporte e Infraestructura, Nicaragua
PCA	Portland Cement Association, o sea Asociación del Cemento Pórtland
PR	Penetration Rate o sea Tasa de Penetración Dinámica
SAMI	Sistema de Administración de Mantenimiento Integral
SIECA	Secretaría de Integración Económica Centroamericana
SN	Structural Number o sea Número Estructural
SOPTRAVI	Secretaría de Obras Públicas, Transporte y Vivienda, Honduras
TMAA	Temperatura Media Anual
TPDA	Tránsito Promedio Diario Anual
Uf	Daño Relativo

DEFINICIONES

Agregado: Un material granular duro de composición mineralógica como la arena, la grava, la escoria, o la roca triturada, usado para ser mezclado en diferente tamaños.

Alcantarilla: Cualquier estructura por debajo de la subrasante de una carretera u otras obras viales, con el objeto de evacuar las aguas superficiales y profundas.

Balasto: Una capa superficial de material selecto consistiendo por lo general de material granular natural o agregado triturado, que se coloca sobre la subrasante terminada de una carreteras, con el objeto de protegerla y que sirva de superficie de rodadura, para permitir el libre tránsito durante todas las épocas del año.

Base: Es la capa de espesor diseñado, constituyente de la estructura del pavimento, destinada fundamentalmente a distribuir y transmitir las cargas originadas por el tránsito, a las capas subyacentes y sobre la cual se coloca la carpeta de rodadura.

Calzada: Zona de la carretera destinada a la circulación de vehículos, con ancho suficiente para acomodar un cierto número de carriles para el movimiento de los mismos, excluyendo los hombros laterales.

Carpeta o Superficie de Rodamiento o Rodadura: La parte superior de un pavimento, por lo general de pavimento bituminoso o rígido, que sostiene directamente la circulación vehicular.

Carretera, calle o camino: Un calificativo general que designa una vía pública para fines de tránsito de vehículo, y que incluye la extensión total comprendida dentro del derecho de vía.

Daños: Desperfectos ocurridos en la superficie de una carretera debido a efectos de clima y tránsito.

Deflexión: El desplazamiento vertical temporal de un pavimento proveniente de la aplicación de cargas de las ruedas de los vehículos.

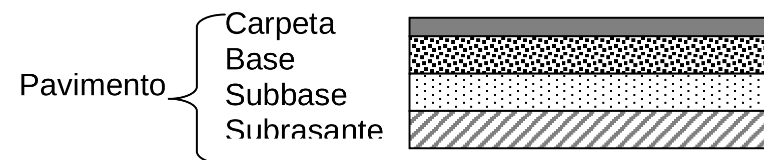
Derecho de Vía: El área de terreno que el Gobierno suministra para ser usada en la construcción de la carretera, sus estructuras, anexos y futuras ampliaciones.

Hombro (Berma): Las áreas de la carretera, contiguas y paralelas a la carpeta o superficie de rodadura, que sirven de confinamiento a la capa de base y de zona de estacionamiento accidental de vehículos.

Mantenimiento: Conjunto de tareas de limpieza, reemplazo y reparación que se realizan de manera regular y ordenada en una carretera, para asegurar su buen funcionamiento y la prolongación de su vida de servicio, al máximo compatible con las previsiones de diseño y construcción de la obra.

Mejoramiento: Ejecución de las actividades constructivas necesarias para dotar a una carretera existente, en bueno, regular o mal estado, de mejores condiciones físicas y operativas de las que disponía anteriormente, para ampliar su capacidad o simplemente ofrecer un mejor servicio al usuario.

Pavimento: La estructura integral de las capas de subrasante, sub-base, base y carpeta colocado en cima de la rasante y destinada a sostener las cargas vehiculares.



Reconstrucción: Trabajo mayor de rehabilitación de una carretera en mal estado, para restablecer sus condiciones físicas a un mejor nivel de servicio, al que fue construida anteriormente.

Rehabilitación: Ejecución de las actividades constructivas necesarias para restablecer las condiciones físicas de la carretera a su situación como fue construida originalmente.
Rugosidad: La desviación vertical del perfil de un pavimento de su forma tal como fue diseñado y que resulta en incomodidades en el manejo del vehículo. Por lo general, la rugosidad se mide para fines de mantenimiento vial por medio de IRI.

Subrasante: Capa de terreno de una carretera, que soporta la estructura del pavimento y que se extiende hasta una profundidad en que no le afecte la carga de diseño que corresponde al tránsito previsto.

Tránsito: Circulación de personas y vehículos por calles, carreteras, etc.

FE DE ERRATA				
Capítulo	**Página**	**Sección**	**Dice**	**Debe decir**
3	1	Pie de nota	Kip = 1,000 kgs.	Kip = 1,000 lbs.
3	3	3.2	AASHO	AASHTO
4	2	4.1	(líquido e índice plástico)	(límite líquido, plástico e índice de plasticidad)
7	30	7.12 b)	; para el efecto se recomiendan los siguientes valores para las diferentes pruebas a realizarse con materiales de subbase y base:	"OMITIR PARRAFO"
7	53	a) i.	82 kN	80 kN
7	61	7.2	VIII Módulo de reacción k	IX Módulo de reacción k
7	71	7.2.2	a.3) Período de diseño	b.3) Período de diseño
7	71	7.2.2	a.4) Tránsito	b.4) Tránsito
7	74	7.2.2	a.5) Factor de seguridad de carga	b.5) Factor de seguridad de carga
7	74	7.2.2	b) Diseño de espesores	c) Diseño de espesores
8	15	8.4	82 kN	80 kN
8	17	Ejemplo	82 kN	80 kN

CAPÍTULO 1

CONDICIONES ACTUALES DE LOS PAVIMENTOS EN CENTROAMERICA

1.1 Antecedentes

En el período comprendido entre 1,898 y 1,944 ocurrieron en el mundo diversos cambios tecnológicos, tanto en el sistema de transporte como en los equipos que se utilizaban para prestar los servicios correspondientes. Estos cambios permitieron reducciones importantes en el tiempo que se invertía en los traslados, así como en los riesgos para las personas y mercancías, lo cual se tradujo en disminución significativa en los costos.

Entre los medios de transporte existentes a principios de siglo pasado, predominaban los carruajes para personas, las bestias de carga, carretas de bueyes y carretas de mulas. El automóvil comenzaba a usarse. Los trazos de estas carreteras eran sinuosos e irregulares, y en los lugares montañosos muchas de las pendientes eran pronunciadas, pues tenían valores entre el 10 % y el 20 % y en época lluviosa eran casi intransitables.

A finales de 1,920 los gobiernos de la región centroamericana concedieron más importancia a las carreteras y ampliaron antiguas veredas.

En el año de 1,945 se consideraba que la red vial en Centroamérica ya superaba los 40,000 kilómetros. En su gran mayoría, eran carreteras de tierra, transitables parcialmente en época seca y muy pocos caminos, quizás el 10%, tenían una cubierta de rodadura.

Anteriormente a lo indicado, los países de Centroamérica, habían iniciado sus gestiones para establecer oficinas que se encargaran de controlar el diseño, construcción, mantenimiento, atención de emergencias, control de transporte y en general, fuera el ente regulador sobre el que se definieran las políticas de desarrollo en todo lo concerniente a carreteras y al transporte por las mismas.

En Centroamérica el transporte automotor por carretera es el medio más importante para la movilización, siendo ésta relevante en el intercambio comercial. En el año de 1,964 solo dos de cada tres toneladas utilizaban el transporte por carreteras y en 1,970 atendió al 94 % de la carga total.

La red vial centroamericana en 1,960 implementó notablemente el espacio geográfico económico, lo que dio por resultado una ampliación del mercado y una protección efectiva de los productos centroamericanos frente a los provenientes del exterior.

Dicho de otra manera, la red vial ha provocado una disminución apreciable de los tiempos de recorrido entre los países del área.

Para el año 1,970, ya se contaba con un inventario de carreteras en Centroamérica, según su tipo de rodadura, ver tabla 1-1:

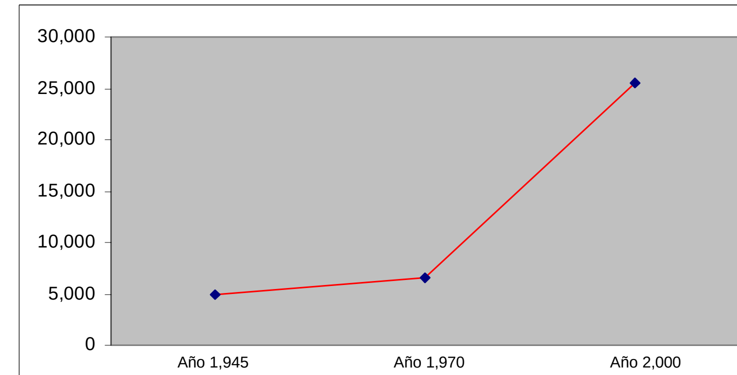
Tabla 1-1
Longitud de carreteras en Centroamérica en 1,970

Tipo de carretera	Longitud (km)
Pavimentada, superficie de asfalto y de cemento Portland	6,719
De grava, piedra o suelo estabilizado	13,901
De tierra transitable todo el tiempo	11,395
De tierra transitable en estación seca	29,499
TOTAL	61,514

Fuente: Dictamen Técnico Regional, para la preparación del Manual Centroamericano para Diseño de Pavimentos, 2,001.

El crecimiento vial se refleja en la Figura 1-1, la cual desde el año de 1,945, pasando por 1,970, hasta el año 2,000, muestra una tendencia de crecimiento respecto a las carreteras que eran recubiertas con una estructura de distribución de carga.

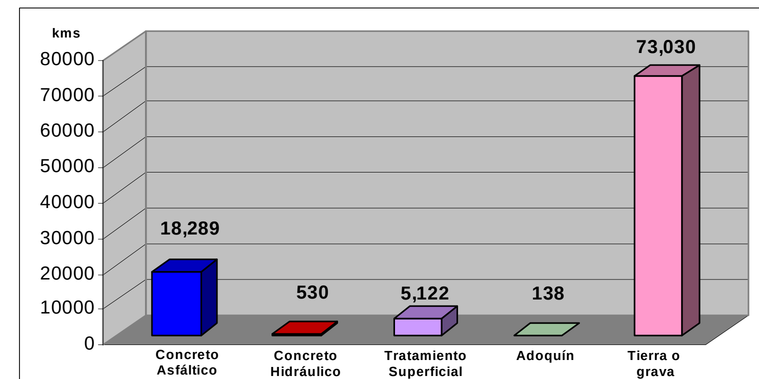
Figura 1-1
Crecimiento de carreteras con recubrimiento en su superficie



Fuente: Dictamen Técnico Regional, para la preparación del Manual Centroamericano para Diseño de Pavimentos, 2,001.

Dentro del territorio centroamericano en el año 2,000, prácticamente todo el transporte se realiza por carreteras. Más de 100,000 kilómetros de carreteras de todo tipo enlazan el campo con las ciudades y complementan una infraestructura disponible para satisfacer las necesidades de movilidad de personas y mercancías, desplazando diariamente 2.8 millones de vehículos automotores.

Figura 1-2
Distribución en Centroamérica, de los distintos tipos de rodadura



Fuente: Dictamen Técnico Regional, para la preparación del Manual Centroamericano para Diseño de Pavimentos, 2,001.

Tabla 1-2
Longitud de kilómetros por tipo de rodadura, año 2,001

Tipo / País	Costa Rica	El Salvador	Guatemala	Honduras	Nicaragua
Mezcla Asfáltica	2,135	1,378	2,736	1,934	1,957
Concreto Hidráulico	65	51	60	220	0
Tratamiento Superficial	2,271	1,026	2,239	623	2,885
Grava o tierra	3,100	3,070	9,303	10,826	14,040
Adoquín	0	0	0	0	138
TOTAL	7,571	5,525	14,338	13,603	19,020

NOTA: Es la red vial responsabilidad de cada Ministerio
Fuente: Dictamen Técnico Regional, para la preparación del Manual Centroamericano para Diseño de Pavimentos, 2,001.

En general, Centroamérica se ha desarrollado a raíz de mejorar su posición económica intraregional e internacional, lo cual ha sido posible por la ampliación de sus comunicaciones hacia puestos fronterizos y zonas de comercio en los distintos puertos de ambos océanos.

Estos corredores principales, tienen la característica esencial de haberse desarrollado para unir las principales zonas económicas de cada país, así como eslabón de la ruta internacional interamericana.

1.2 Diseños utilizados

Los métodos o técnicas, más utilizados en Centroamérica, se refieren siempre a la guía de diseño de la AASHTO, edición 1,993, para los pavimentos asfálticos e hidráulicos. Esta versión será actualizada y publicada en el año 2,003, por lo que se recomienda que a finales del próximo año sea revisada y comparada, verificando si los cambios fueran de forma o de fondo, para así poder actualizar el nuevo manual.

También para el diseño en concreto hidráulico, utilizan la guía de PCA (Portland Cement Association). A pesar de que la tendencia en Centroamérica, va encaminada hacia concretos asfálticos, Costa Rica

y El Salvador están incrementando el uso de concreto hidráulico, por la razón de que han nivelado los precios de mercado y la realización de grandes inversiones de equipo y tecnología, por parte de empresas privadas. Adicionalmente en Costa Rica se efectúan para la estructura diseñada análisis de fatiga y deformación permanente empleando modelos mecanísticos empíricos.

La mayoría de países de la región utilizan sus propias especificaciones, básicamente para control y procedimiento de trabajos que se realizarán. Estas citan al libro de AASHTO en lo referente a especificaciones, de materiales y métodos a usar. En algunos otros casos utilizan ASTM. En las Especificaciones de SIECA, éstas hacen también mención a AASHTO para ciertos controles.

Sobre la tecnología SUPERPAVE, únicamente en Costa Rica se observa un grado de avance en su utilización, ya que la Universidad de Costa Rica, está implementando un laboratorio con equipo y personal calificado para el efecto. Las especificaciones de agregados para mezcla asfáltica están basadas en recomendaciones del SUPERPAVE en cuanto a granulometría y requisitos de calidad. La metodología de diseño de mezcla asfáltica se ha utilizado en forma oficial en la ruta San Ramón – Barranca para lo cual, a finales del año 1,999 un laboratorio de USA, elaboró el diseño utilizando asfalto AC-30 modificado con polímeros, y un agregado con graduación que cumpliera los requisitos de SUPERPAVE. En Honduras se utilizó en la rehabilitación de la carretera, tramo Comayagua – Siguatepeque.

La principal herramienta de la tecnología SUPERPAVE que más se ha utilizado, es la clasificación del cemento asfáltico, por su grado de desempeño. En los demás países, aún no se aplican estos controles, porque estiman que a corto plazo no se piensan implementar. Cuentan con muy poca bibliografía o ninguna.

1.3 Tránsito

Respecto a normas que se han utilizado para definir pesos y dimensiones, los países del área se han regido en las desarrolladas por SIECA y aprobadas en 1,958. En base a esto, cada país realizaba sus modificaciones, de acuerdo a sus necesidades o requerimientos

especiales. Cada país ha generado sus propias tablas de clasificación vehicular y en el año 2,001, se han estandarizado a raíz de la actualización del Acuerdo Centroamericano sobre Circulación por Carreteras, también realizado por SIECA.

La mayoría de países están haciendo esfuerzos en la implementación de control de pesos y dimensiones (básculas) para normar la circulación del tránsito pesado y regular de esta forma, las cargas sobre las cuales se diseñan, tanto carreteras como puentes.

La utilización del método para determinar ejes equivalentes para el diseño de pavimentos, es usado en todos los países de la región, sin embargo, el mayor problema observado es que, no cuentan con controles de tránsito actualizados y en algunos casos no llenan los requerimientos técnicos para ayudar al diseñador a establecer las proyecciones futuras, ni factores para las conversiones necesarias.

1.4 Drenaje

Para el diseño de pavimentos, todos los países coinciden en utilizar el normativo definido en AASHTO, el cual delimita los coeficientes para el diseño y los factores que deben observarse con respecto al sistema de drenaje de las estructuras de pavimento.

En Nicaragua utilizan sus propias normas, que consideran el régimen de lluvia de cada zona y coeficientes en base al tiempo (días – horas) que el agua se elimina de las capas granulares.

1.5 Mitigación

Con relación a disposiciones que utilizan los países para la mitigación del medio ambiente por el impacto de la construcción de estructuras de pavimento, cada país si considera medidas de mitigación. Cuenta con una oficina especifica en cada Ministerio, en la cual se contemplan las disposiciones ambientales para cada proyecto. Regulan el manejo de bancos de extracción de agregados, campamentos, área de botaderos de desperdicios, etc. Todos los países coinciden en que los entes financieros externos exigen estudios ambientales para todos los proyectos que van a financiar y realizan los mecanismos necesarios para su cumplimiento.

1.6 Rehabilitación

Respecto a las consideraciones estructurales que se utilizan para el diseño de sobrecapas o recarpeteos de pavimentos en uso, cada país mostró un distinto procedimiento.

En Costa Rica consideran los siguientes parámetros: Evaluación deflectométrica, Composición de la estructura de pavimento, CBR de la Subrasante, Características de las capas existentes y Capacidad Residual del Pavimento.

En El Salvador las consideraciones planteadas, son el producto de los trabajos efectuados por la sección de geotécnica y de pruebas no destructivas (viga Benkelman, prueba de impacto, etc.), con la intención de definir la capacidad portante de cada una de las capas.

En Guatemala se realizan los diseños para el recapeo de tramos carreteros, por medio del Sistema de Administración de Mantenimiento Integral (SAMI), que recomienda las políticas respecto a las labores de mantenimiento rutinario y periódico.

En Honduras utilizan el método de las deflexiones. Este método consiste básicamente en determinar el espesor del refuerzo requerido, para reducir la deflexión representativa o evaluada, a niveles admisibles o tolerables para el tráfico esperado en el período de diseño.

Nicaragua por su parte, no ha realizado trabajos de este tipo, únicamente sellos de 3 centímetros de espesor. Básicamente lo utilizan para evitar filtraciones de agua a la estructura de pavimento existente.

En caso de pavimentos reconstruidos o rehabilitados, todos los países coinciden en que utilizan los mismos criterios para los trabajos de recarpeteado mencionados en párrafos anteriores.

El método de la prueba de deflexión por peso (Falling Weigth Deflectometer, FWD) es utilizado en Centroamérica, aunque su uso tiene distintas fechas de inicio. En Costa Rica y El Salvador, se ha iniciado recientemente la utilización de este método para su diseño de

pavimentos. En el caso de Costa Rica todavía prevalece el uso de la viga Benkelman. En Guatemala, se utiliza dicho método para el diseño de pavimentos. Honduras no lo utiliza, solo usan la viga Benkelman y un camión cargado con 8,200 kg para evaluar las deflexiones en el pavimento. Nicaragua utiliza únicamente la viga Benkelman para conocer la capacidad estructural necesaria para soportar sellos asfálticos sin que se reflejen daños a la estructura.

Con relación a que si el método FWD se lleva para tener registros del comportamiento de los pavimentos, se pudo observar que la mayoría de estos controles lo ejercen empresas privadas, aunque los países que están implementando sistemas de administración de pavimentos, esperan que estos contratos lleven estos registros y poder tener mayor información en el futuro.

1.7 Materiales

En los países de la región se utilizan materiales explotados directamente de los proyectos viales en bancos de préstamo y en algunos países se usa el canto rodado, aprobado por los entes supervisores o las Direcciones de Caminos responsables del proyecto. En la mayoría de casos, se colocan plantas trituradoras, para mejor control granulométrico del material. En algunos casos, los países tienen definidas zonas geológicas, en las que la clasificación de materiales para obras de ingeniería ya están establecidas.

Con la utilización de materiales no tradicionales o no convencionales para el diseño de pavimentos, tales como: polímeros, vidrio, chips de llantas, etc. no se observa mayor experiencia de su utilización en Centroamérica, únicamente el uso de polímeros en lechadas asfálticas, sellos y microcarpetas. Honduras no tiene ninguna experiencia en esta área y Costa Rica utiliza aditivos modificadores del asfalto, para mejorar las características de susceptibilidad a la humedad y resistencia a la deformación permanente. La Tabla 1-3 muestra los análisis de laboratorio que se realizan a materiales utilizados en diseño de pavimentos:

Tabla 1-3
Análisis de Laboratorios que se realizan a los materiales

No.	Prueba	Costa Rica	El Salvador	Guatemala	Honduras	Nicaragua
1	Límite de Atteberg	SI	SI	SI	SI	SI
2	Granulometría	SI	SI	SI	SI	SI
3	Proctor (densidad)	SI	SI	SI		
4	CBR	SI	SI	SI	SI	SI
5	Clasificación AASHTO	SI	SI	SI		
6	Desgaste	SI	SI	SI	SI	SI
7	Intemperismo acelerado	SI	SI	SI		SI
8	Adherencia asfáltica	SI	SI	SI		SI
9	Afinidad agregado/asfalto	SI			SI	
10	Índice fracturamiento	SI				
11	Caras fracturadas	SI	SI	SI	SI	SI
12	Peso Especifico	SI	SI	SI	SI	SI
13	Gravedad específica	SI		SI		SI
14	Absorción	SI		SI	SI	SI
15	Equivalente de arena	SI	SI	SI	SI	SI
16	Estabilidad Marshall	SI	SI	SI		SI
17	Contenido de vacíos	SI	SI	SI		SI
18	Contenido de asfaltos	SI	SI	SI		SI
19	humedad de los agregados	SI	SI	SI		SI
20	Colorimetría				SI	
21	Sanidad	SI			SI	
22	Índice laminar	SI	SI		SI	
23	Penetración del asfalto	SI	SI	SI	SI	
24	Viscosidad	SI	SI	SI	SI	
25	Residuo de asfalto	SI	SI		SI	
26	Ductibilidad	SI			SI	
27	Porcentaje de agua	SI			SI	
28	Temperatura de la mezcla	SI	SI	SI		SI
29	Densidad	SI	SI	SI		SI
30	Deformación (Deflexión)	SI	SI	SI		SI
31	Índice de durabilidad	SI				
32	Alterabilidald de sulfatos	SI			SI	

Fuente: Dictamen Técnico Regional, para la preparación del Manual Centroamericano para Diseño de Pavimentos, 2,001.

Costa Rica utiliza cemento asfáltico AC-20 y emulsión asfáltica CRS-1h. El Salvador, Guatemala y Honduras utilizan cementos asfálticos, emulsiones y asfaltos rebajados; Nicaragua utiliza cemento asfáltico y asfaltos rebajados. Para el concreto hidráulico, todos coinciden en la utilización del cemento Portland Tipo I.

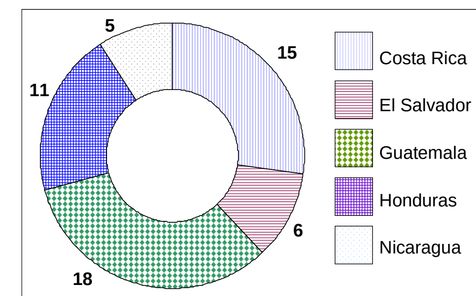
1.8 Capacidad Instalada

Con relación a la capacidad tecnológica disponible, tanto en personal profesional y auxiliar, para el diseño y construcción de pavimentos, Costa Rica, Guatemala y Honduras si cuentan con personal, tanto estatal como de la iniciativa privada para dicho fin.

El Salvador y Nicaragua dependen de la infraestructura que posean las empresas contratadas para la realización de los trabajos; únicamente son fiscalizadores de las acciones realizadas, para lo cual si cuentan con el personal necesario.

En relación a plantas asfálticas, Centroamérica cuenta con más de 50 plantas de fabricación de mezcla asfáltica, ver Figura 1-3. Casi todas estas plantas pertenecen a empresas privadas que realizan labores a los Ministerios de Transporte, así como suministran mezcla a otras empresas para labores menores. La mayoría de estos fabricantes cuentan además con planta procesadora de agregados, con lo cual garantizan un producto final de buena calidad.

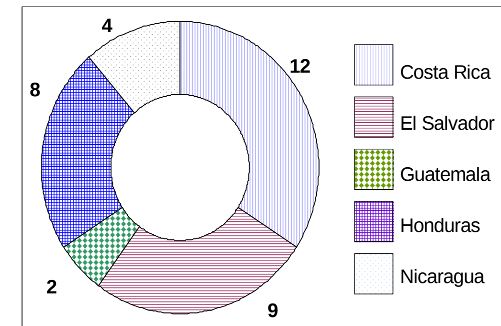
Figura 1-3
Distribución regional de plantas para la fabricación de mezcla asfáltica



Fuente: Dictamen Técnico Regional, para la preparación del Manual Centroamericano para Diseño de Pavimentos, 2,001.

Plantas procesadoras de Concreto Hidráulico en Centroamérica, existen más de 30, las cuales también son responsables por el procesamiento de agregados. Ver Figura 1-4.

Figura 1-4
Distribución regional de plantas para la fabricación de Concreto Hidráulico



Fuente: Dictamen Técnico Regional, para la preparación del Manual Centroamericano para Diseño de Pavimentos, 2,001.

En general, la mayoría de empresas productoras de mezclas asfálticas y concreto hidráulico, cuentan con la tecnología y el equipo necesario para realizar labores de colocación, control de calidad y acabados finales.

Centroamérica cuenta con la orografía y formación geológica suficiente para obtener de cualquier zona geográfica, materiales apropiados para su explotación. La mayoría de estos agregados se obtienen de la trituración de roca , ya sean cantos rodados o bancos de préstamo.

1.9 Controles

Con relación a conteos de tránsito para obtener el TPDA, Costa Rica realiza conteos manuales desde antes de 1,995 y lo efectúa anualmente. Actualmente están contratando una empresa privada para que efectúe la actualización de datos del TPD en las 1,106 secciones de conteo establecidas por Planificación del MOPT. Existen al menos 8 conteos automáticos del sistema captador y detector, pero en la actualidad aparentemente solo funciona uno. Se están instalando

además 8 aparatos de conteo automático de Bucle de inducción magnética, en zonas estratégicas del país.

El Salvador realiza conteos y encuestas de origen y destino.

Guatemala realiza dichos conteos 2 veces al año, en rutas seleccionadas.

Honduras a través de SOPTRAVI realiza conteos cada dos años, y con el apoyo de empresas Consultoras del Fondo Vial, se realizan adicionalmente conteos anuales, de siete días de duración.

Nicaragua por su parte efectúa conteos, pero no están establecidos en toda la red.

Algunos países han contratado sistemas de administración de pavimentos, los cuales realizarán y actualizarán esta información. Actualmente solo se utilizan para proyectos específicos.

1.10 Diseño versus lo construido

Respecto a la variante resultante del diseño original de una carretera y lo construido, en el caso de El Salvador, algunos contratistas han propuesto un cambio al diseño, ofreciendo concreto hidráulico en vez de mezcla asfáltica, manteniendo los mismos precios.

En Honduras, Guatemala y Nicaragua si el proyecto se desfasa en el inicio de su ejecución, se revisa nuevamente el diseño estructural de acuerdo al tránsito y otras variables.

Ningún Ministerio de Transporte cuenta con una oficina que tenga control sobre si las carreteras han durado el tiempo para el que fueron diseñadas. Algunos países coinciden en que dada la falta de control en los pesos de los vehículos, estos procesos de deterioro se han acelerado considerablemente. En algunos casos, los países que cuentan con Administración de Pavimentos, establecen parámetros iniciales, al concluirse una obra nueva o reconstruida, a partir de los cuales, pueden obtenerse niveles de servicio (IRI, Indice de serviciabilidad, etc) cada cierto tiempo y así observar su grado de deterioro en el futuro.

1.11 Mantenimiento

En lo que coinciden todos los países, es que el mantenimiento rutinario y periódico prolonga sustancialmente la vida útil de los pavimentos, sin importar el tipo de rodadura que posea; sin embargo, se comenta que en algunos casos, las actividades de mantenimiento no son sostenibles y muchas veces se realizan únicamente de manera reactiva, al haber fallas que ocasionan daño a los usuarios.

En general, en muchas carreteras, el mantenimiento rutinario sirve únicamente para mantener habilitada la ruta sin baches, aunque con un alto grado de incomodidad en la conducción, dado lo avanzado del deterioro que algunas vías presentan.

1.12 Resumen

a) El desarrollo de carreteras en forma técnica comenzó en Centroamérica en el siglo pasado, alrededor de los años 40, debido al aprovechamiento de los adelantos tecnológicos en materia de transporte. Todo ello requirió la ampliación de las mismas, así como un desarrollo adecuado de sus normas geométricas, tanto en el alineamiento horizontal como vertical, para brindarle seguridad y comodidad al usuario.

b) Este desarrollo obligó a que las carreteras se mantuvieran en buenas condiciones durante el mayor tiempo posible y para que no se deterioraran tan rápidamente, se hizo necesario colocarles una cubierta que resistiera tanto el desgaste como las cargas verticales a que estuvieran sometidas.

c) Esta tendencia obligó a implementar una estructura adecuada a los requerimientos que imponían los vehículos, tanto por su peso como por sus dimensiones y por su impacto al rodar sobre las carreteras.

d) Esta situación obligó a hacer revisiones de acuerdo con los adelantos tecnológicos, analizando, estudiando e investigando, para poder seleccionar procedimientos que permitieran obtener diseños de pavimentos más resistentes y duraderos.

e) También se logró concientizar a las autoridades superiores, sobre la importancia económica, política y social, de contar con carreteras construidas con buenos materiales, con estructuras adecuadas a los requerimientos de carga, con una duración que corresponda a su inversión y a su relación costo – beneficio. Estos beneficios permiten competir en los mercados internacionales de transporte de carga y pasajeros, así como contribuir al sostenimiento de los patrimonios viales en Centroamérica.

f) El "Manual Centroamericano para Diseño de Pavimentos" tendrá gran importancia porque constituirá una herramienta con los últimos adelantos de la tecnología y tendrá información de fácil interpretación y aplicación, para que en un futuro la red de carreteras coadyuve a mejorar el desarrollo de la integración de Centroamérica.

CAPÍTULO 2

CONSIDERACIONES PARA EL DISEÑO

Introducción

Dentro de las consideraciones que deben tomarse en cuenta para el diseño de estructuras de pavimento, es necesario analizar fundamentalmente la problemática que representa el comportamiento de los pavimentos debido al tránsito, ya que éste se incrementa conforme el desarrollo tecnológico y crecimiento demográfico, lo que trae a su vez mayor cantidad de repetición de ejes y cargas.

Por ello, es necesario la selección de apropiados factores para el diseño estructural de los diferentes tipos de pavimentos, por lo que deberá tomarse en cuenta la clasificación de la carretera dentro de la red vial, la selección de los diferentes tipos de materiales a utilizarse, el tránsito y los procesos de construcción.

En los siguientes capítulos, se encontrarán diferentes métodos para la determinación de los factores de diseño y su uso. Es necesario tener conocimiento sobre el tránsito, medio ambiente y condiciones de la subrasante para la cantidad de vehículos que circula en las carreteras, adicionalmente la calidad de materiales y especificaciones o normas de construcción son requeridas para mejorar el rendimiento de ellas por muchos períodos de tiempo.

2.1 Clasificación de calles y carreteras

La clasificación es el proceso por medio del cual las calles y carreteras son organizadas dentro de un sistema funcional, de acuerdo con el carácter de servicio que prestan y que ayude a seleccionar los factores apropiados de tránsito y otras variables que sean necesarias, según se muestran en la tabla 2-1:

Tabla 2-1
Clasificación funcional de las carreteras Regionales, Volúmenes de Tránsito, Número de carriles y Tipo de Superficie de Rodadura

TPDA	> 20,000		20,000 – 10,000		10,000–3,000		3,000 - 500	
Clasificación Funcional	C	S	C	S	C	S	C	S
AR – Autopistas Regionales	6 – 8	Pav.	4 – 6	Pav.				
TS – Troncales Suburbanas	4	Pav.	2 - 4	Pav.	2	Pav.		
TR – Troncales Rurales	4	Pav.	2 – 4	Pav.	2	Pav.		
CS – Colectoras Suburbanas			2 - 4	Pav.	2	Pav.	2	Pav.
CR – Colectoras Rurales					2	Pav.	2	Pav.

TPDA = Tránsito promedio diario anual; C= Número de carriles; S= Superficie de rodadura; Pav. = pavimentadas
Fuente: Manual Centroamericano de Normas para el Diseño Geométrico de las Carreteras Regionales, SIECA, 2,001

2.2 Selección de variables de diseño

Las propiedades de la subrasante, características de los materiales, importancia del tránsito, factores de medio ambiente y otro tipo de variables, son las que intervienen en el diseño de estructuras de pavimento. Muchas veces, para caminos y calles de menor importancia, la información no está disponible o actualizada, por lo que es necesario recabarla.

Algunos valores de diseño están especificados y pueden variar con el tipo de carretera ó nivel de tránsito. Para tránsito pesado se han seleccionado valores más conservadores con resultado de espesores mayores. Por ejemplo, un valor de esfuerzo de diseño para la subrasante, puede resultar bajo para un tránsito pesado pero aceptable para un tráfico liviano.

Poco conocimiento de las características de la subrasante y las propiedades de otros materiales particularmente de la pavimentación, variarán su calidad y desempeño, lo que traerá como consecuencia un alto costo de mantenimiento; también la selección del tipo de base puede afectar el comportamiento del pavimento.

2.3 Criterios de diseño

En los procedimientos de diseño, la estructura de un pavimento es considerada como un sistema de capas múltiples y los materiales de cada una de las capas se caracterizan por su propio Módulo de Elasticidad.

La evaluación de tránsito esta dada por la repetición de una carga en un eje simple equivalente de 80 kN (18,000 lbs) aplicada al pavimento en un conjunto de dos juegos de llantas dobles. Para propósitos de análisis estas dobles llantas equivalen a dos platos circulares con un radio de 115 mm ó 4.52´´ espaciados 345 mm ó 13.57´´ centro a centro, correspondiéndole 80 kN ó 18,000 lbs de carga al eje y 483 kPa ó 70 PSI de presión de contacto sobre la superficie.

Este procedimiento puede ser usado para el diseño de pavimentos compuestos de varias combinaciones de superficies, bases y subbases. La subrasante que es la capa más baja de la estructura de pavimento, se asume infinita en el sentido vertical y horizontal; las otras capas de espesor finito son asumidas finitas en dirección horizontal. En la superficie de contacto entre las capas se asume que existe una completa continuidad o adherencia.

En la metodología que desarrollará este manual, las cargas colocadas sobre la superficie de un pavimento producen dos esfuerzos que son críticos para los propósitos de diseño; un esfuerzo horizontal de tensión ϵ_t[1] en la parte de abajo de la capa de superficie y el esfuerzo de compresión vertical ϵ_c[1] actuando sobre la superficie de la subrasante.

Si el esfuerzo de tensión horizontal es excesivo, pueden resultar grietas en la capa de rodadura. Si la fuerza vertical de compresión es excesiva, resultarán deformaciones permanentes en la estructura de pavimento debido a la sobre carga en la subrasante. Una excesiva deformación de las capas solamente puede ser controlada por las limitaciones de las propiedades de los materiales.

[1] Terminología utilizada por Instituto de Asfalto (MS-1) Febrero 1,991

2.4 Características de los Materiales

Todos los materiales están caracterizados por el Módulo de Elasticidad, llamado Módulo Dinámico en mezclas asfálticas; Módulo de Resiliencia para los materiales granulares sin tratar y los materiales de los suelos. El Módulo Dinámico en mezclas de asfalto es dependiente de la temperatura sobre el pavimento. Para simular los efectos de temperatura y sus cambios a través del año, se utilizan tres distribuciones típicas del promedio mensual de temperatura que a su vez representan tres regiones típicas.

El Módulo Dinámico es función directa del tiempo de fraguado y un período de seis meses es el utilizado para la elaboración de las tablas de diseño, ya que períodos de fraguado arriba de los 24 meses no tienen ninguna influencia significativa sobre el espesor que se muestra en las tablas de diseño.

En el caso de suelos estabilizados, las características mecánicas de los materiales cambian sustancialmente con la aplicación de productos estabilizadores, ya que el módulo de resiliencia se incrementa en valores apreciables. Es necesario, que al utilizar productos estabilizadores de suelos, se efectúen los correspondientes estudios de laboratorio, para determinar los límites adecuados de las cantidades o porcentajes hasta los cuales puede llegar su uso.

Cuando se utiliza cemento como material estabilizador, es conveniente saber la cantidad máxima a utilizar, en función de los cambios físicos que experimentan los suelos, ya que una cantidad alta de cemento, hace que los materiales obtengan valores altos de resistencia mecánica, pero también contracciones fuertes que se traducen en agrietamientos, nada deseables para la estructura de pavimento, por el hecho de que estas grietas se reflejarán posteriormente en la superficie de rodadura.

Al utilizar otro tipo de estabilizadores, tales como: Cal, Bitúmenes, puzolanas, químicos, etc. también es necesario efectuar pruebas de laboratorio para analizar cuales son las limitantes de uso de cada producto. Para estos últimos, la reacción de los suelos al aplicar este tipo de estabilizadores, es más benigna por los efectos de contracción

y se obtendrán capacidades de esfuerzos menores, dependiendo de la cantidad de producto utilizado, por lo que se producirán grietas más pequeñas, las cuales no tendrán una influencia significativa en el comportamiento de las mismas.

Otras ventajas que se obtienen con los productos estabilizadores, es que puede utilizar más de uno a la vez, lo que redunda en beneficio del material estabilizado, por el hecho de obtener en la mezcla mejores características de comportamiento, como son: resistencia en poco tiempo, impermeabilidad, reducción en los límites de consistencia, grietas muy pequeñas, etc.

Por ejemplo, un material de base que es necesario colocar en un área húmeda o con lluvias frecuentes, se puede utilizar una parte de cemento y otra de cal, lo que permitirá obtener una mezcla con una resistencia inicial adecuada pero sin agrietarse por efecto del cemento, pero la cal le seguirá incrementando su resistencia, aparte de las otra ventajas ya mencionadas.

También es factible el uso de cemento con emulsión asfáltica para mejorar las condiciones de una base, mejorando su capacidad soporte y por ende su módulo de resiliencia; además de obtener un material que soporta en mejor forma los efectos de la humedad.

En general se puede concluir, que cuando no se cuenta con suelos adecuados para la estructura de pavimento, tales como subrasantes, subbases y bases que cumplan con las exigencias ó especificaciones, y que económicamente sea necesario recurrir al uso de productos estabilizadores, es conveniente que los materiales de cada una de las capas ya estabilizadas estén acorde con la capacidad de esfuerzo de las otras capas contiguas, ya que no es conveniente que una capa sea rígida y otra flexible o que una capa impermeable quede bajo una permeable.

2.5 Efectos de la Temperatura en la estructura de pavimento

En adición a los efectos de cambio de temperatura a través del año, en el Módulo Dinámico de las mezclas asfálticas, las curvas de diseño

también resultan afectadas con respecto a los efectos de temperatura sobre el Módulo de resiliencia de la subrasante y los materiales granulares de la subbase y base. Para la Subrasante esto se realiza al incrementarse el Módulo de Resiliencia de la misma en el período de enfriamiento y se reduce cuando se produce calentamiento.

2.6 Costos del ciclo de vida

En los procedimientos de diseño es necesario realizar un estudio de costo del ciclo de vida de las alternativas de pavimentos diseñados, que le permitan al diseñador tomar una decisión sobre los tipos de pavimentos más convenientes a construir, tomando también en consideración las políticas de mantenimiento.

CAPÍTULO 3

ANÁLISIS DE TRÁNSITO

Introducción

El método o técnica más utilizada en Centroamérica para el diseño de estructuras de pavimento con capas finales de rodadura tanto asfálticas como de concreto hidráulico, siempre se refiere a la AASHTO[1]; en este método la información requerida en las ecuaciones de diseño incluye: la carga por eje, la configuración del mismo, así como el número de aplicaciones o paso de este eje sobre la superficie de pavimento.

Los pavimentos se diseñan en función del efecto del daño que produce el paso de un eje con una carga y para que resistan un determinado número de cargas aplicadas durante su vida útil. Un tránsito mixto esta compuesto de vehículos de diferente peso y número de ejes y que para efectos de cálculo se les transforma en un número de ejes equivalentes de 80 kN o 18 kips[2], por lo que se les denominará “Equivalent simple axial load” o **ESAL** (ejes equivalentes).

3.1 Volúmenes de tránsito

Para el diseño de estructuras de pavimento es necesario conocer el número de vehículos que pasan por un punto dado. Para el efecto se realizan estudios de volúmenes de tránsito, los cuales pueden variar desde los más amplios en un sistema de caminos, hasta el recuento en lugares específicos tales como: puentes, túneles o intersecciones de carreteras.

Estos aforos se realizan con el objeto de:

- Determinar la composición y volumen de tránsito en un sistema de carreteras.

[1] Guía para el diseño de estructuras de pavimento, 1993
[2] Kip = 1,000 kgs. = 10 kN

- Determinar el número de vehículos que transitan en cierta zona o que circulan dentro de ella.
- Evaluar índices de accidentes.
- Servir de base para la clasificación de caminos.
- Datos útiles para la planeación de rutas y determinación de proyectos geométricos.
- Proyectar sistemas de control de tránsito.
- Elaborar sistemas de mantenimiento.
- Establecer prioridades y técnicas de construcción.
- Determinar el tránsito futuro, etc.

En todo estudio de volúmenes de tránsito es necesario obtener dos datos básicos: el tránsito medio diario general y el tránsito medio diario de camiones. Estos se pueden obtener al efectuar censos o aforos de tránsito en el lugar de la construcción o si es nueva, mediante censos o aforos de tránsito en lugares próximos.

Existen mapas de volumen de tránsito que muestran en determinados lugares el numero de vehículos diarios, pero es más exacto el efectuar el aforo o censo en un lugar específico; **es necesario que al efectuar una evaluación de tránsito para una carretera determinada, se tome en cuenta la localización geográfica de la misma dentro del complejo de la red vial y áreas que la circundan, con el objeto de tomar en cuenta hasta donde sea posible los futuros desarrollos de complejos habitacionales, industriales, turísticos, agrícolas y proyectos de carácter regional, que contribuirán más adelante con el tiempo a incrementar el flujo vehicular de la carretera proyectada[3].**

El tránsito cambia según el día de la semana, cambia según la semana del mes, cambia según la estación o época del año, cambia según los días de descanso o asueto, etc. Por lo que es necesario hasta donde sea posible, contar con estadísticas de períodos largos de evaluación del tránsito, para analizar el comportamiento de los diferentes volúmenes y tipos de vehículos, que nos permitan en mejor forma evaluar las cargas que se aplicarán a la estructura de pavimento.

---

[3] Referencia para el uso de la tabla 3-19

Dentro de estas consideraciones también es necesario conocer las tasas de crecimiento o incremento anual del tránsito, la distribución por dirección en cada sentido del camino y si fuera en carreteras con más de dos vías, la distribución vehicular en cada una de ellas.

3.2 Consideraciones para el cálculo de ejes equivalentes

Las diferentes cargas que actúan sobre un pavimento producen a su vez diferentes tensiones y deformaciones en el mismo; los diferentes espesores de pavimentos y diferentes materiales, responden en igual forma de diferente manera a igual carga. Como estas cargas producen diferentes tensiones y deformaciones en el pavimento, las fallas tendrán que ser distintas.

Para tomar en cuenta esta diferencia, el volumen de tránsito se transforma en un número equivalente de ejes de una determinada carga, que a su vez producirá el mismo daño que toda la composición de tránsito mixto de los vehículos. Esta carga uniformizada según AASHO es de 80 kN o 18 Kips y la conversión se hace a través de los Factores Equivalentes de Carga **LEF** (Load Equivalent Factor).

El proceso de convertir un tránsito mixto en un número de **ESAL´s** de 80 kN fue desarrollado por el Road Test de AASHO. Para este ensayo se cargaron pavimentos similares con diferentes configuraciones de ejes y cargas, para analizar el daño que produjeron.

El índice de serviciabilidad de un pavimento, es el valor que indica el grado de confort que tiene la superficie para el desplazamiento natural y normal de un vehículo; en otra palabras, un pavimento en perfecto estado se le asigna un valor de serviciabilidad inicial que depende del diseño del pavimento y de la calidad de la construcción, de 5 (Perfecto); y un pavimento en franco deterioro o con un índice de serviciabilidad final que depende de la categoría del camino y se adopta en base a esto y al criterio del proyectista, con un valor de 0 (Pésimas condiciones).

A la diferencia entre estos dos valores se le conoce como la pérdida de serviciabilidad ($\triangle$PSI) o sea el índice de serviciabilidad presente (Present Serviciability Index).

Los valores que se recomiendan dependiendo del tipo de pavimento son los siguientes:

Índice de serviciabilidad inicial:

Po= 4.5 para pavimentos rígidos
Po= 4.2 para pavimentos flexibles

Índice de serviciabilidad final:

Pt= 2.5 o más para caminos muy importantes
Pt= 2.0 para caminos de tránsito menor

El índice de serviciabilidad de un pavimento, es un valor de apreciación con el cual se valúan las condiciones de deterioro o confort de la superficie de rodadura de un pavimento; actualmente para medir este deterioro se utiliza el IRI, Índice Internacional de Rugosidad (International Roughness Index), para lo cual se utiliza un equipo sofisticado montado en un vehículo, el que al pasar sobre la superficie de una carretera, va midiendo los altibajos y los suma, por lo que al final se obtiene un valor acumulado en metros por kilómetro (m/km) o pulgada por milla (plg/milla).

Para correlacionar el Índice de Serviciabilidad y el IRI, se utiliza la siguiente fórmula[4]:

$$PSI = 5 \times e^{(-0.0041 \times IRI)}$$

En donde:

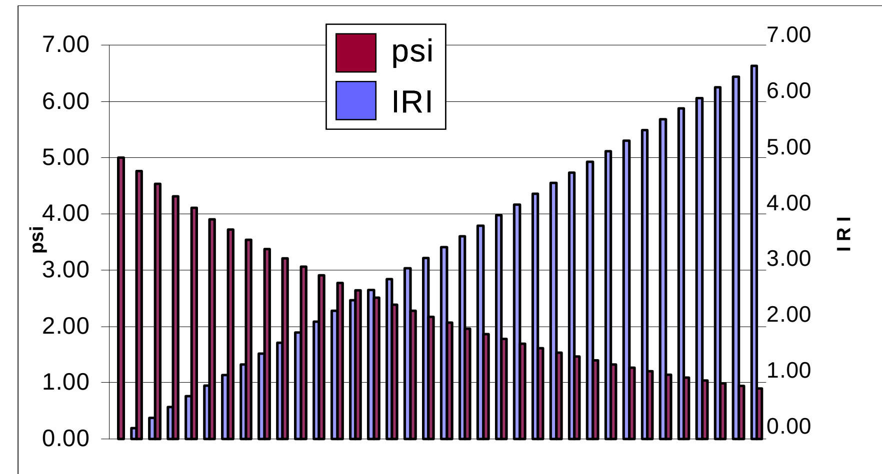
PSI = Índice de Serviciabilidad
IRI = Índice Internacional de Rugosidad
e = 2.71828183 (base de los logaritmos neperianos)

Es de tomar en cuenta, que en esta fórmula y con estos valores, lo que se obtiene es **pulgadas por milla.**

[4] Desarrollada por el Departamento de Transportes de Illinois, USA:

En la Figura 3-1, se presenta la correlación entre PSI e IRI, en la cual ya se ha hecho la conversión a metros por kilómetro.

Figura 3-1
Correlación PSI - IRI



Fuente: Generada por el Consultor

Por lo anteriormente expuesto, el Factor Equivalente de Carga (**LEF**), es el valor numérico que expresa la relación entre la pérdida de serviciabilidad causada por la carga de un tipo de eje de 80 kN y la producida por un eje estándar en el mismo eje.

$$LEF = \frac{\text{No. de ESAL´s de 80 kN que producen una pérdida de serviciabilidad}}{\text{No. De ejes de 80 kN que producen la misma pérdida de serviciabilidad}}$$

Como cada tipo de pavimento responde de manera diferente a una carga, los LEFs también cambian en función del tipo de pavimento. Por lo que, los pavimentos rígidos y flexibles tienen diferentes LEFs y que también cambia según el SN (Structural Number, número estructural) en pavimentos flexibles y según el espesor de la losa en pavimentos rígidos, además que también cambia según el valor del índice de serviciabilidad asumido para el diseño.

Entonces, para calcular los ESAL´s que se aplicarán a una estructura de pavimento es necesario **asumir** en primera instancia, para

pavimentos flexibles el número estructural (SN) que se considere adecuado a las cargas y para pavimentos rígidos el espesor de la losa que se necesita para las cargas que se van a imponer; también se tendrá que asumir el índice de serviciabilidad final aceptable, de acuerdo con los programas de mantenimiento que se considere necesario según el tipo de carretera.

Las siguientes tablas indican los diferentes LEFs para distintos tipos de cargas por eje, para distintos tipos de pavimentos y distintos índices de serviciabilidad finales.

TABLAS DE FACTORES EQUIVALENTE DE CARGA[5]

Tabla 3-1

Factores equivalentes de carga para pavimentos flexibles, ejes simples, P_t = 2,0

Carga p/eje (kips)[6]	Número estructural SN					
	1	2	3	4	5	6
2	0.0002	0.0002	0.0002	0.0002	0.0002	0.0002
4	0.002	0.003	0.002	0.002	0.002	0.002
6	0.009	0.012	0.011	0.010	0.009	0.009
8	0.03	0.035	0.036	0.033	0.031	0.029
10	0.075	0.085	0.090	0.085	0.079	0.076
12	0.165	0.177	0.189	0.183	0.174	0.168
14	0.325	0.338	0.354	0.350	0.338	0.331
16	0.589	0.598	0.613	0.612	0.603	0.596
18	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
20	1.61	1.59	1.56	1.55	1.57	1.59
22	2.49	2.44	2.35	2.31	2.35	2.41
24	3.71	3.62	3.43	3.33	3.40	3.51
26	5.36	5.21	4.88	4.68	4.77	4.96
28	7.54	7.31	6.78	6.42	6.52	6.83
30	10.4	10.0	9.2	8.6	8.7	9.2
32	14.0	13.5	12.4	11.5	11.5	12.1
34	18.5	17.9	16.3	15.0	14.9	15.6
36	24.2	23.3	21.2	19.3	19.0	19.9
38	31.1	29.9	27.1	24.6	24.0	25.1
40	39.6	38.0	34.3	30.9	30.0	31.2
42	49.7	47.7	43.0	38.6	37.2	38.5
44	61.8	59.3	53.4	47.6	45.7	47.1
46	76.1	73.0	65.6	58.3	55.7	57.0
48	92.9	89.1	80.0	70.9	67.3	68.6
50	113.	108.	97.	86.	81.	82.

[5] AASHTO Guía para el diseño de estructuras de pavimento, 1,993, tablas D-1 a D-18
[6] Kip = 1,000 kgs. = 10 kN

Tabla 3-2

Factores equivalentes de carga para pavimentos flexibles, ejes tándem, P_t = 2,0

Carga p/eje (kips)	Número estructural SN					
	1	2	3	4	5	6
2	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
4	0.0003	0.0003	0.0003	0.0002	0.0002	0.0002
6	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001
8	0.003	0.003	0.003	0.003	0.003	0.002
10	0.007	0.008	0.008	0.007	0.006	0.006
12	0.013	0.016	0.016	0.014	0.013	0.012
14	0.024	0.029	0.029	0.026	0.024	0.023
16	0.041	0.048	0.050	0.046	0.042	0.040
18	0.066	0.077	0.081	0.075	0.069	0.066
20	0.103	0.117	0.124	0.117	0.109	0.105
22	0.156	0.171	0.183	0.174	0.164	0.158
24	0.227	0.244	0.260	0.252	0.239	0.231
26	0.322	0.340	0.360	0.353	0.338	0.329
28	0.447	0.465	0.487	0.481	0.466	0.455
30	0.607	0.623	0.646	0.643	0.627	0.617
32	0.810	0.823	0.843	0.842	0.829	0.819
34	1.06	1.07	1.08	1.08	1.08	1.07
36	1.38	1.38	1.38	1.38	1.38	1.38
38	1.76	1.75	1.73	1.72	1.73	1.74
40	2.22	2.19	2.15	2.13	2.16	2.18
42	2.77	2.73	2.64	2.62	2.66	2.70
44	3.42	3.36	3.23	3.18	3.24	3.31
46	4.20	4.11	3.92	3.83	3.91	4.02
48	5.10	4.98	4.72	4.58	4.68	4.83
50	6.15	5.99	5.64	5.44	5.56	5.77
52	7.37	7.16	6.71	6.43	6.56	6.83
54	8.77	8.51	7.93	7.55	7.69	8.03
56	10.4	10.1	9.3	8.8	9.0	9.4
58	12.2	11.8	10.9	10.3	10.4	10.9
60	14.3	13.8	12.7	11.9	12.0	12.6
62	16.6	16.0	14.7	13.7	13.8	14.5
64	19.3	18.6	17.0	15.8	15.8	16.6
66	22.2	21.4	19.6	18.0	18.0	18.9
68	25.5	24.6	22.4	20.6	20.5	21.5
70	29.2	28.1	25.6	23.4	23.2	24.3
72	33.3	32.0	29.1	26.5	26.2	27.4
74	37.8	36.4	33.0	30.0	29.4	30.8
76	42.8	41.2	37.3	33.8	33.1	34.5
78	48.4	46.5	42.0	38.0	37.0	38.6
80	54.4	52.3	47.2	42.5	41.3	43.0
82	61.1	58.7	52.9	47.6	46.0	47.8
84	68.4	65.7	59.2	53.0	51.2	53.0
86	76.3	73.3	66.0	59.0	56.8	58.6
88	85.0	81.6	73.4	65.5	62.8	64.7
90	94.4	90.6	81.5	72.6	69.4	71.3

Tabla 3-3

Factores equivalentes de carga para pavimentos flexibles, ejes tridem, P_t = 2,0

Carga p/eje (kips)	Número estructural SN					
	1	2	3	4	5	6
2	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
4	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001
6	0.0004	0.0004	0.0003	0.0003	0.0003	0.0003
8	0.0009	0.0010	0.0009	0.0008	0.0007	0.0007
10	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002	0.001
12	0.004	0.004	0.004	0.003	0.003	0.003
14	0.006	0.007	0.007	0.006	0.006	0.005
16	0.010	0.012	0.012	0.010	0.009	0.009
18	0.016	0.019	0.019	0.017	0.015	0.015
20	0.024	0.029	0.029	0.026	0.024	0.023
22	0.034	0.042	0.042	0.038	0.035	0.034
24	0.049	0.058	0.060	0.055	0.051	0.048
26	0.068	0.080	0.083	0.077	0.071	0.068
28	0.093	0.107	0.113	0.105	0.098	0.094
30	0.125	0.140	0.149	0.140	0.131	0.126
32	0.164	0.182	0.194	0.184	0.173	0.167
34	0.213	0.233	0.248	0.238	0.225	0.217
36	0.273	0.294	0.313	0.303	0.288	0.279
38	0.346	0.368	0.390	0.381	0.364	0.353
40	0.434	0.456	0.481	0.473	0.454	0.443
42	0.538	0.560	0.587	0.580	0.561	0.548
44	0.662	0.682	0.710	0.705	0.686	0.673
46	0.807	0.825	0.852	0.849	0.831	0.818
48	0.976	0.992	1.015	1.014	0.999	0.987
50	1.17	1.18	1.20	1.20	1.19	1.18
52	1.40	1.40	1.42	1.42	1.41	1.40
54	1.66	1.66	1.66	1.66	1.66	1.66
56	1.95	1.95	1.93	1.93	1.94	1.94
58	2.29	2.27	2.24	2.23	2.25	2.27
60	2.67	2.64	2.59	2.57	2.60	2.63
62	3.10	3.05	2.98	2.95	2.99	3.04
64	3.59	3.53	3.41	3.37	3.42	3.49
66	4.13	4.05	3.89	3.83	3.90	3.99
68	4.73	4.63	4.43	4.34	4.42	4.54
70	5.40	5.28	5.03	4.90	5.00	5.15
72	6.15	6.00	5.68	5.52	5.63	5.82
74	6.97	6.79	6.41	6.20	6.33	6.56
76	7.88	7.67	7.21	6.94	7.08	7.36
78	8.88	8.63	8.09	7.75	7.90	8.23
80	9.98	9.69	9.05	8.63	8.79	9.18
82	11.2	10.8	10.1	9.6	9.8	10.2
84	12.5	12.1	11.2	10.6	10.8	11.3
86	13.9	13.5	12.5	11.8	11.9	12.5
88	15.5	15.0	13.8	13.0	13.2	13.8
90	17.2	16.6	15.3	14.3	14.5	15.2

Tabla 3-4
Factores equivalentes de carga para pavimentos flexibles, ejes simples, P_t = 2,5

Carga p/eje (kips)	Número estructural SN					
	1	2	3	4	5	6
2	0.0004	0.0004	0.0003	0.0002	0.0002	0.0002
4	0.003	0.004	0.004	0.003	0.002	0.002
6	0.011	0.017	0.017	0.013	0.010	0.009
8	0.032	0.047	0.051	0.041	0.034	0.031
10	0.078	0.102	0.118	0.102	0.088	0.080
12	0.168	0.198	0.229	0.213	0.189	0.176
14	0.328	0.358	0.399	0.388	0.360	0.342
16	0.591	0.613	0.646	0.645	0.623	0.606
18	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
20	1.61	1.57	1.49	1.47	1.51	1.55
22	2.48	2.38	2.17	2.09	2.18	2.30
24	3.69	3.49	3.09	2.89	3.03	3.27
26	5.33	4.99	4.31	3.91	4.09	4.48
28	7.49	6.98	5.90	5.21	5.39	5.98
30	10.3	9.5	7.9	6.8	7.0	7.8
32	13.9	12.8	10.5	8.8	8.9	10.0
34	18.4	16.9	13.7	11.3	11.2	12.5
36	24.0	22.0	17.7	14.4	13.9	15.5
38	30.9	28.3	22.6	18.1	17.2	19.0
40	39.3	35.9	28.5	22.5	21.1	23.0
42	49.3	45.0	35.6	27.8	25.6	27.7
44	61.3	55.9	44.0	34.0	31.0	33.1
46	75.5	68.8	54.0	41.4	37.2	39.3
48	92.2	83.9	65.7	50.1	44.5	46.5
50	112.	102	79.	60.	53.	55.

Tabla 3-5
Factores equivalentes de carga para pavimentos flexibles, ejes tándem, P_t = 2,5

Carga p/eje (kips)	Número estructural SN					
	1	2	3	4	5	6
2	0.0001	0.0001	0.0001	0.0000	0.0000	0.0000
4	0.0005	0.0005	0.0004	0.0003	0.0003	0.0002
6	0.002	0.002	0.002	0.001	0.001	0.001
8	0.004	0.006	0.005	0.004	0.003	0.003
10	0.008	0.013	0.011	0.009	0.007	0.006
12	0.015	0.024	0.023	0.018	0.014	0.013
14	0.026	0.041	0.042	0.033	0.027	0.024
16	0.044	0.065	0.070	0.057	0.047	0.043
18	0.070	0.097	0.109	0.092	0.077	0.070
20	0.107	0.141	0.162	0.141	0.121	0.110
22	0.160	0.198	0.229	0.207	0.180	0.166
24	0.231	0.273	0.315	0.292	0.260	0.242
26	0.327	0.370	0.420	0.401	0.364	0.342
28	0.451	0.493	0.548	0.534	0.495	0.470
30	0.611	0.648	0.703	0.695	0.658	0.633
32	0.813	0.843	0.889	0.887	0.857	0.834
34	1.06	1.08	1.11	1.11	1.09	1.08
36	1.38	1.38	1.38	1.38	1.38	1.38
38	1.75	1.73	1.69	1.68	1.70	1.73
40	2.21	2.16	2.06	2.03	2.08	2.14
42	2.76	2.67	2.49	2.43	2.51	2.61
44	3.41	3.27	2.99	2.88	3.00	3.16
46	4.18	3.98	3.58	3.40	3.55	3.79
48	5.08	4.80	4.25	3.98	4.17	4.49
50	6.12	5.76	5.03	4.64	4.86	5.28
52	7.33	6.87	5.93	5.38	5.63	6.17
54	8.72	8.14	6.95	6.22	6.47	7.15
56	10.3	9.6	8.1	7.2	7.4	8.2
58	12.1	11.3	9.4	8.2	8.4	9.4
60	14.2	13.1	10.9	9.4	9.6	10.7
62	16.5	15.3	12.6	10.7	10.8	12.1
64	19.1	17.6	14.5	12.2	12.2	13.7
66	22.1	20.3	16.6	13.8	13.7	15.4
68	26.3	23.3	18.9	15.6	15.4	17.2
70	29.0	26.6	21.5	17.6	17.2	19.2
72	33.0	30.3	24.4	19.8	19.2	21.3
74	37.5	34.4	27.6	22.2	21.3	23.6
76	42.5	38.9	31.1	24.8	23.7	26.1
78	48.0	43.9	35.0	27.8	26.2	28.8
80	54.0	49.4	39.2	30.9	29.0	31.7
82	60.6	55.4	43.9	34.4	32.0	34.8
84	67.8	61.9	49.0	38.2	35.3	38.1
86	75.7	69.1	54.5	42.3	38.8	41.7
88	84.3	76.9	60.6	46.8	42.6	45.6
90	93.7	85.4	67.1	51.7	46.8	49.7

Tabla 3-6

Factores equivalentes de carga para pavimentos flexibles, ejes tridem, $P_t = 2,5$

Carga p/eje (kips)	Número estructural SN					
	1	2	3	4	5	6
2	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
4	0.0002	0.0002	0.0002	0.0001	0.0001	0.0001
6	0.0006	0.0007	0.0005	0.0004	0.0003	0.0003
8	0.001	0.002	0.001	0.001	0.001	0.001
10	0.003	0.004	0.003	0.002	0.002	0.002
12	0.005	0.007	0.006	0.004	0.003	0.003
14	0.008	0.012	0.010	0.008	0.006	0.006
16	0.012	0.019	0.018	0.013	0.011	0.010
18	0.018	0.029	0.028	0.021	0.017	0.016
20	0.027	0.042	0.042	0.032	0.027	0.024
22	0.038	0.058	0.060	0.048	0.040	0.036
24	0.053	0.078	0.084	0.068	0.057	0.051
26	0.072	0.103	0.114	0.095	0.080	0.072
28	0.098	0.133	0.151	0.128	0.109	0.099
30	0.129	0.169	0.195	0.170	0.145	0.133
32	0.169	0.213	0.247	0.220	0.191	0.175
34	0.219	0.266	0.308	0.281	0.246	0.228
36	0.279	0.329	0.379	0.352	0.313	0.292
38	0.352	0.403	0.461	0.436	0.393	0.368
40	0.439	0.491	0.554	0.533	0.487	0.459
42	0.543	0.594	0.661	0.644	0.597	0.567
44	0.666	0.714	0.781	0.769	0.723	0.692
46	0.811	0.854	0.918	0.911	0.868	0.838
48	0.979	1.015	1.072	1.069	1.033	1.005
50	1.17	1.20	1.24	1.25	1.22	1.20
52	1.40	1.41	1.44	1.44	1.43	1.41
54	1.66	1.66	1.66	1.66	1.66	1.66
56	1.95	1.93	1.90	1.90	1.91	1.93
58	2.29	2.25	2.17	2.16	2.20	2.24
60	2.67	2.60	2.48	2.44	2.51	2.58
62	3.09	3.00	2.82	2.76	2.85	2.95
64	3.57	3.44	3.19	3.10	3.22	3.36
66	4.11	3.94	3.61	3.47	3.62	3.81
68	4.71	4.49	4.06	3.88	4.05	4.30
70	5.38	5.11	4.57	4.32	4.52	4.84
72	6.12	5.79	5.13	4.80	5.03	5.41
74	6.93	6.54	5.74	5.32	5.57	6.04
76	7.84	7.37	6.41	5.88	6.15	6.71
78	8.83	8.28	7.14	6.49	6.78	7.43
80	9.92	9.28	7.95	7.15	7.45	8.21
82	11.1	10.4	8.8	7.9	8.2	9.0
84	12.4	11.6	9.8	8.6	8.9	9.9
86	13.8	12.9	10.8	9.5	9.8	10.9
88	15.4	14.3	11.9	10.4	10.6	11.9
90	17.1	15.8	13.2	11.3	11.6	12.9

Tabla 3-7

Factores equivalentes de carga para pavimentos flexibles, ejes simples, P_t = 3,0

Carga p/eje (kips)	Número estructural SN					
	1	2	3	4	5	6
2	0.0008	0.0009	0.0006	0.0003	0.0002	0.0002
4	0.004	0.008	0.006	0.004	0.002	0.002
6	0.014	0.030	0.028	0.018	0.012	0.010
8	0.035	0.070	0.080	0.055	0.040	0.034
10	0.082	0.132	0.168	0.132	0.101	0.086
12	0.173	0.231	0.296	0.260	0.212	0.187
14	0.332	0.388	0.468	0.447	0.391	0.358
16	0.594	0.633	0.695	0.693	0.651	0.622
18	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
20	1.60	1.53	1.41	1.38	1.44	1.51
22	2.47	2.29	1.96	1.83	1.97	2.16
24	3.67	3.33	2.69	2.39	2.60	2.96
26	5.29	4.72	3.65	3.08	3.33	3.91
28	7.43	6.56	4.88	3.93	4.17	5.00
30	10.2	8.9	6.5	5.0	5.1	6.3
32	13.8	12.0	8.4	6.2	6.3	7.7
34	18.2	15.7	10.9	7.8	7.6	9.3
36	23.8	20.4	14.0	9.7	9.1	11.0
38	30.6	26.2	17.7	11.9	11.0	13.0
40	38.8	33.2	22.2	14.6	13.1	15.3
42	48.8	41.6	27.6	17.8	15.5	17.8
44	60.6	51.6	34.0	21.6	18.4	20.6
46	74.7	63.4	41.5	26.1	21.6	23.8
48	91.2	77.3	50.3	31.3	25.4	27.4
50	110.	94.	61.	37.	30.	32.

Tabla 3-8
Factores equivalentes de carga para pavimentos flexibles, ejes tándem, $P_t = 3,0$

Carga p/eje (kips)	Número estructural SN					
	1	2	3	4	5	6
2	0.0002	0.0002	0.0001	0.0001	0.0000	0.0000
4	0.001	0.001	0.001	0.000	0.000	0.000
6	0.003	0.004	0.003	0.002	0.001	0.001
8	0.006	0.011	0.009	0.005	0.003	0.003
10	0.011	0.024	0.020	0.012	0.008	0.007
12	0.019	0.042	0.039	0.024	0.017	0.014
14	0.031	0.066	0.068	0.045	0.032	0.026
16	0.049	0.096	0.109	0.076	0.055	0.046
18	0.075	0.134	0.164	0.121	0.090	0.076
20	0.113	0.181	0.232	0.182	0.139	0.119
22	0.166	0.241	0.313	0.260	0.205	0.178
24	0.238	0.317	0.407	0.358	0.292	0.257
26	0.333	0.413	0.517	0.476	0.402	0.360
28	0.457	0.534	0.643	0.614	0.538	0.492
30	0.616	0.684	0.788	0.773	0.702	0.656
32	0.817	0.870	0.956	0.953	0.896	0.855
34	1.07	1.10	1.15	1.15	1.12	1.09
36	1.38	1.38	1.38	1.38	1.38	1.38
38	1.75	1.71	1.64	1.62	1.66	1.70
40	2.21	2.11	1.94	1.89	1.98	2.08
42	2.75	2.59	2.29	2.19	2.33	2.50
44	3.39	3.15	2.70	2.52	2.71	2.97
46	4.15	3.81	3.16	2.89	3.13	3.50
48	5.04	4.58	3.70	3.29	3.57	4.07
50	6.08	5.47	4.31	3.74	4.05	4.70
52	7.27	6.49	5.01	4.24	4.57	5.37
54	8.65	7.67	5.81	4.79	5.13	6.10
56	10.2	9.0	6.7	5.4	5.7	6.9
58	12.0	10.6	7.7	6.1	6.4	7.7
60	14.1	12.3	8.9	6.8	7.1	9.8
62	16.3	14.2	10.2	7.7	7.8	9.5
64	18.9	16.4	11.6	8.6	8.6	10.5
66	21.8	18.9	13.2	9.6	9.5	11.6
68	25.1	21.7	15.0	10.7	10.5	12.7
70	28.7	24.7	17.0	12.0	11.5	13.9
72	32.7	28.1	19.2	13.3	12.6	15.2
74	37.2	31.9	21.6	14.8	13.8	16.5
76	42.1	36.0	24.3	16.4	15.1	17.9
78	47.5	40.6	27.3	18.2	16.5	19.4
80	53.4	45.7	30.5	20.1	18.0	21.0
82	60.0	51.2	34.0	22.2	19.6	22.7
84	67.1	57.2	37.9	24.6	21.3	24.5
86	74.9	63.8	42.1	27.1	23.2	26.4
88	83.4	71.0	46.7	29.8	25.2	28.4
90	92.7	78.8	51.7	32.7	27.4	30.5

Tabla 3-9

Factores equivalentes de carga para pavimentos flexibles, ejes tridem, P_t = 3,0

Carga p/eje (kips)	Número estructural SN					
	1	2	3	4	5	6
2	0.0001	0.0001	0.0001	0.0000	0.0000	0.0000
4	0.0005	0.0004	0.0003	0.0002	0.0001	0.0001
6	0.001	0.001	0.001	0.001	0.000	0.000
8	0.003	0.004	0.002	0.001	0.001	0.001
10	0.005	0.008	0.005	0.003	0.002	0.002
12	0.007	0.014	0.010	0.006	0.004	0.003
14	0.011	0.023	0.018	0.011	0.007	0.006
16	0.016	0.035	0.030	0.018	0.013	0.010
18	0.022	0.050	0.047	0.029	0.020	0.017
20	0.031	0.069	0.069	0.044	0.031	0.026
22	0.043	0.090	0.097	0.065	0.046	0.039
24	0.059	0.116	0.132	0.092	0.066	0.056
26	0.079	0.145	0.174	0.126	0.092	0.078
28	0.104	0.179	0.223	0.168	0.126	0.107
30	0.136	0.218	0.279	0.219	0.167	0.143
32	0.176	0.265	0.342	0.279	0.218	0.188
34	0.226	0.319	0.413	0.350	0.279	0.243
36	0.286	0.382	0.491	0.432	0.352	0.310
38	0.359	0.456	0.577	0.524	0.437	0.389
40	0.447	0.543	0.671	0.626	0.536	0.483
42	0.550	0.643	0.775	0.740	0.649	0.593
44	0.673	0.760	0.889	0.865	0.777	0.720
46	0.817	0.894	1.014	1.001	0.920	0.865
48	0.984	1.048	1.152	1.148	1.080	1.030
50	1.18	1.23	1.30	1.31	1.26	1.22
52	1.40	1.43	1.47	1.48	1.45	1.43
54	1.66	1.66	1.66	1.66	1.66	1.66
56	1.95	1.92	1.86	1.85	1.88	1.91
58	2.28	2.21	2.09	2.06	2.13	2.20
60	2.66	2.54	2.34	2.28	2.39	2.50
62	3.08	2.92	2.61	2.52	2.66	2.84
64	3.56	3.33	2.92	2.77	2.96	3.19
66	4.09	3.79	3.25	3.04	3.27	3.58
68	4.68	4.31	3.62	3.33	3.60	4.00
70	5.34	4.88	4.02	3.64	3.94	4.44
72	6.08	5.51	4.46	3.97	4.31	4.91
74	6.89	6.21	4.94	4.32	4.69	5.40
76	7.78	6.98	5.47	4.70	5.09	5.93
78	8.76	7.83	6.04	5.11	5.51	6.48
80	9.84	8.75	6.67	5.54	5.96	7.06
82	11.0	9.8	7.4	6.0	6.4	7.7
84	12.3	10.9	8.1	6.5	6.9	8.3
86	13.7	12.1	8.9	7.0	7.4	9.0
88	15.3	13.4	9.8	7.6	8.0	9.6
90	16.9	14.8	10.7	8.2	8.5	10.4

Tabla 3-10

Factores equivalentes de carga para pavimentos rígidos, ejes simples, P_t = 2,0

Carga p/eje (kips)	Espesor de losa D (en pulgadas)								
	6	7	8	9	10	11	12	13	14
2	0.0002	0.0002	0.0002	0.0002	0.0002	0.0002	0.0002	0.0002	0.0002
4	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002
6	0.011	0.010	0.010	0.010	0.010	0.010	0.010	0.010	0.010
8	0.035	0.033	0.032	0.032	0.032	0.032	0.032	0.032	0.032
10	0.087	0.084	0.082	0.081	0.080	0.080	0.080	0.080	0.080
12	0.186	0.180	0.176	0.175	0.174	0.174	0.173	0.173	0.173
14	0.353	0.346	0.341	0.338	0.337	0.336	0.336	0.336	0.336
16	0.614	0.609	0.604	0.601	0.599	0.599	0.598	0.598	0.598
18	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
20	1.55	1.56	1.57	1.58	1.58	1.59	1.59	1.59	1.59
22	2.32	2.32	2.35	2.38	2.40	2.41	2.41	2.41	2.42
24	3.37	3.34	3.40	3.47	3.51	3.53	3.54	3.55	3.55
26	4.76	4.69	4.77	4.88	4.97	5.02	5.04	5.06	5.06
28	6.48	6.44	6.52	6.70	6.85	6.94	7.00	7.02	7.04
30	8.92	8.68	8.74	8.98	9.23	9.39	9.48	9.54	9.56
32	11.9	11.5	11.5	11.8	12.2	12.4	12.6	12.7	12.7
34	15.5	15.0	14.9	15.3	15.8	16.2	16.4	16.6	16.7
36	20.1	19.3	19.2	19.5	20.1	20.7	21.1	21.4	21.5
38	25.6	24.5	24.3	24.6	25.4	26.1	26.7	27.1	27.4
40	32.2	30.8	30.4	30.7	31.6	32.6	33.4	34.0	34.4
42	40.1	38.4	37.7	38.0	38.9	40.1	41.3	42.1	42.7
44	49.4	47.3	46.4	46.6	47.6	49.0	50.4	51.6	52.7
46	60.4	57.7	56.6	56.7	57.7	59.3	61.1	62.6	63.7
48	73.2	69.9	68.4	68.4	69.4	71.2	73.3	75.3	76.8
50	88.0	84.1	82.2	82.0	83.0	84.9	87.4	89.8	91.7

Tabla 3-11
Factores equivalentes de carga para pavimentos rígidos, ejes tándem, P_t = 2,0

Carga p/eje (kips)	Espesor de losa D (en pulgadas)								
	6	7	8	9	10	11	12	13	14
2	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001
4	0.0006	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005
6	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002
8	0.006	0.006	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005
10	0.014	0.013	0.013	0.012	0.012	0.012	0.012	0.012	0.012
12	0.028	0.026	0.026	0.025	0.025	0.025	0.025	0.025	0.025
14	0.051	0.049	0.048	0.047	0.047	0.047	0.047	0.047	0.047
16	0.087	0.084	0.082	0.081	0.081	0.080	0.080	0.080	0.080
18	0.141	0.136	0.133	0.132	0.131	0.131	0.131	0.131	0.131
20	0.216	0.210	0.206	0.204	0.203	0.203	0.203	0.203	0.203
22	0.319	0.313	0.307	0.305	0.304	0.303	0.303	0.303	0.303
24	0.454	0.449	0.444	0.441	0.440	0.439	0.439	0.439	0.439
26	0.629	0.626	0.622	0.620	0.618	0.618	0.618	0.618	0.618
28	0.852	0.851	0.850	0.850	0.850	0.849	0.849	0.849	0.849
30	1.13	1.13	1.14	1.14	1.14	1.14	1.14	1.14	1.14
32	1.48	1.48	1.49	1.50	1.51	1.51	1.51	1.51	1.51
34	1.90	1.90	1.93	1.95	1.96	1.97	1.97	1.97	1.97
36	2.42	2.41	2.45	2.49	2.51	2.52	2.53	2.53	2.53
38	3.04	3.02	3.07	3.13	3.17	3.19	3.20	3.20	3.21
40	3.79	3.74	3.80	3.89	3.95	3.98	4.00	4.01	4.01
42	4.67	4.59	4.66	4.78	4.87	4.93	4.95	4.97	4.97
44	5.72	5.59	5.67	5.82	5.95	6.03	6.07	6.09	6.10
46	6.94	6.76	6.83	7.02	7.20	7.31	7.37	7.41	7.43
48	8.36	8.12	8.17	8.40	8.63	8.79	8.88	8.93	8.96
50	10.00	9.69	9.72	9.98	10.27	10.49	10.62	10.69	10.73
52	11.9	11.5	11.5	11.8	12.1	12.4	12.6	12.7	12.8
54	14.0	13.5	13.5	13.8	14.2	14.6	14.9	15.0	15.1
56	16.5	15.9	15.8	16.1	16.6	17.1	17.4	17.6	17.7
58	19.3	18.5	18.4	18.7	19.3	19.8	20.3	20.5	20.7
60	22.4	21.5	21.3	21.6	22.3	22.9	23.5	23.8	24.0
62	25.9	24.9	24.6	24.9	25.6	26.4	27.0	27.5	27.7
64	29.9	28.6	28.2	28.5	29.3	30.2	31.0	31.6	31.9
66	34.3	32.8	32.3	32.6	33.4	34.4	35.4	36.1	36.5
68	39.2	37.5	36.8	37.1	37.9	39.1	40.2	41.1	41.6
70	44.6	42.7	41.9	42.1	42.9	44.2	45.5	46.6	47.3
72	50.6	48.4	47.5	47.6	48.5	49.9	51.4	52.6	53.5
74	57.3	54.7	53.6	53.6	54.6	56.1	57.7	59.2	60.3
76	64.6	61.7	60.4	60.3	61.2	62.8	64.7	66.4	67.7
78	72.5	69.3	67.8	67.7	68.6	70.2	72.3	74.3	75.8
80	81.3	77.6	75.9	75.7	76.6	78.3	80.6	82.8	84.7
82	90.9	86.7	84.7	84.4	85.3	87.1	89.6	92.1	94.2
84	101.	97.	94.	94.	95.	97.	99.	102.	105.
86	113.	107.	105.	104.	105.	107.	110.	113.	116.
88	125.	119.	116.	116.	116.	118.	121.	125.	128.
90	138.	132.	129.	128.	129.	131	134.	137.	141.

Tabla 3-12
Factores equivalentes de carga para pavimentos rígidos, ejes tridem, P_t = 2,0

Carga p/eje (kips)	Espesor de losa D (en pulgadas)								
	6	7	8	9	10	11	12	13	14
2	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001
4	0.0003	0.0003	0.0003	0.0003	0.0003	0.0003	0.0003	0.0003	0.0003
6	0.0010	0.0009	0.0009	0.0009	0.0009	0.0009	0.0009	0.0009	0.0009
8	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002
10	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005
12	0.010	0.010	0.009	0.009	0.009	0.009	0.009	0.009	0.009
14	0.018	0.017	0.017	0.016	0.016	0.016	0.016	0.016	0.016
16	0.030	0.029	0.028	0.027	0.027	0.027	0.027	0.027	0.027
18	0.047	0.045	0.044	0.044	0.043	0.043	0.043	0.043	0.043
20	0.072	0.069	0.067	0.066	0.066	0.066	0.066	0.066	0.066
22	0.105	0.101	0.099	0.098	0.097	0.097	0.097	0.097	0.097
24	0.149	0.144	0.141	0.139	0.139	0.138	0.138	0.138	0.138
26	0.205	0.199	0.195	0.194	0.193	0.192	0.192	0.192	0.192
28	0.276	0.270	0.265	0.263	0.262	0.262	0.262	0.262	0.261
30	0.364	0.359	0.354	0.351	0.350	0.349	0.349	0.349	0.349
32	0.472	0.468	0.463	0.460	0.459	0.458	0.458	0.458	0.458
34	0.603	0.600	0.596	0.594	0.593	0.592	0.592	0.592	0.592
36	0.759	0.758	0.757	0.756	0.755	0.755	0.755	0.755	0.755
38	0.946	0.947	0.949	0.950	0.951	0.951	0.951	0.951	0.951
40	1.17	1.17	1.18	1.18	1.18	1.18	1.18	1.18	1.19
42	1.42	1.43	1.44	1.45	1.46	1.46	1.46	1.46	1.46
44	1.73	1.73	1.75	1.77	1.78	1.78	1.79	1.79	1.79
46	2.08	2.07	2.10	2.13	2.15	2.16	2.16	2.16	2.17
48	2.48	2.47	2.51	2.55	2.58	2.59	2.80	2.60	2.61
50	2.95	2.92	2.97	3.03	3.07	3.09	3.10	3.11	3.11
52	3.48	3.44	3.50	3.58	3.63	3.66	3.68	3.69	3.69
54	4.09	4.03	4.09	4.20	4.27	4.31	4.33	4.35	4.35
56	4.78	4.69	4.76	4.89	4.99	5.05	5.08	5.09	5.10
58	5.57	5.44	5.51	5.66	5.79	5.87	5.91	5.94	5.95
60	6.45	6.29	6.35	6.53	6.69	6.79	6.85	6.88	6.90
62	7.43	7.23	7.28	7.49	7.69	7.82	7.90	7.94	7.97
64	8.54	8.28	8.32	8.55	8.80	8.97	9.07	9.13	9.16
66	9.76	9.46	9.48	9.73	10.02	10.24	10.37	10.44	10.48
68	11.1	10.8	10.8	11.0	11.4	11.6	11.8	11.9	12.0
70	12.6	12.2	12.2	12.5	12.8	13.2	13.4	13.5	13.6
72	14.3	13.8	13.7	14.0	14.5	14.9	15.1	15.3	15.4
74	16.1	15.5	15.4	15.7	16.2	16.7	17.0	17.2	17.3
76	18.2	17.5	17.3	17.6	18.2	18.7	19.1	19.3	19.5
78	20.4	19.6	19.4	19.7	20.3	20.9	21.4	21.7	21.8
80	22.8	21.9	21.6	21.9	22.6	23.3	23.8	24.2	24.4
82	25.4	24.4	24.1	24.4	25.0	25.8	26.5	26.9	27.2
84	28.3	27.1	26.7	27.0	27.7	28.6	29.4	29.9	30.2
86	31.4	30.1	29.6	29.9	30.7	31.6	32.5	33.1	33.5
88	34.8	33.3	32.8	33.0	33.8	34.8	35.8	36.6	37.1
90	38.5	36.8	36.2	36.4	37.2	38.3	39.4	40.3	40.9

Tabla 3-13
Factores equivalentes de carga para pavimentos rígidos, ejes simples, P_t = 2,5

Carga p/eje (kips)	Espesor de losa D (en pulgadas)								
	6	7	8	9	10	11	12	13	14
2	0.0002	0.0002	0.0002	0.0002	0.0002	0.0002	0.0002	0.0002	0.0002
4	0.003	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002
6	0.012	0.011	0.010	0.010	0.010	0.010	0.010	0.010	0.010
8	0.039	0.035	0.033	0.032	0.032	0.032	0.032	0.032	0.032
10	0.097	0.089	0.084	0.082	0.081	0.080	0.080	0.080	0.080
12	0.203	0.189	0.181	0.176	0.175	0.174	0.174	0.173	0.173
14	0.376	0.360	0.347	0.341	0.338	0.337	0.336	0.336	0.336
16	0.634	0.623	0.610	0.604	0.601	0.599	0.599	0.599	0.598
18	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
20	1.51	1.52	1.55	1.57	1.58	1.58	1.59	1.59	1.59
22	2.21	2.20	2.28	2.34	2.38	2.40	2.41	2.41	2.41
24	3.16	3.10	3.22	3.36	3.45	3.50	3.53	3.54	3.55
26	4.41	4.26	4.42	4.67	4.85	4.95	5.01	5.04	5.05
28	6.05	5.76	5.92	6.29	6.61	6.81	6.92	6.98	7.01
30	8.16	7.67	7.79	8.28	8.79	9.14	9.35	9.46	9.52
32	10.8	10.1	10.1	10.7	11.4	12.0	12.3	12.6	12.7
34	14.1	13.0	12.9	13.6	14.6	15.4	16.0	16.4	16.5
36	18.2	16.7	16.4	17.1	18.3	19.5	20.4	21.0	21.3
38	23.1	21.1	20.6	21.3	22.7	24.3	25.6	26.4	27.0
40	29.1	26.5	25.7	26.3	27.9	29.9	31.6	32.9	33.7
42	36.2	32.9	31.7	32.2	34.0	36.3	38.7	40.4	41.6
44	44.6	40.4	38.8	39.2	41.0	43.8	46.7	49.1	50.8
46	54.5	49.3	47.1	47.3	49.2	52.3	55.9	59.0	61.4
48	66.1	59.7	56.9	56.8	58.7	62.1	66.3	70.3	73.4
50	79.4	71.7	68.2	67.8	69.6	73.3	78.1	83.0	87.1

Tabla 3-14

Factores equivalentes de carga para pavimentos rígidos, ejes tándem, P_t = 2,5

Carga p/eje (kips)	Espesor de losa D (en pulgadas)								
	6	7	8	9	10	11	12	13	14
2	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001
4	0.0006	0.0006	0.0005	0.0005	0.0005	0.0005	0.0005	0.0005	0.0005
6	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002
8	0.007	0.006	0.006	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005
10	0.015	0.014	0.013	0.013	0.012	0.012	0.012	0.012	0.012
12	0.031	0.028	0.026	0.026	0.025	0.025	0.025	0.025	0.025
14	0.057	0.052	0.049	0.048	0.047	0.047	0.047	0.047	0.047
16	0.097	0.089	0.084	0.082	0.081	0.081	0.080	0.080	0.080
18	0.155	0.143	0.136	0.133	0.132	0.131	0.131	0.131	0.131
20	0.234	0.220	0.211	0.206	0.204	0.203	0.203	0.203	0.203
22	0.340	0.325	0.313	0.308	0.305	0.304	0.303	0.303	0.303
24	0.475	0.462	0.450	0.444	0.441	0.440	0.439	0.439	0.439
26	0.644	0.637	0.627	0.622	0.620	0.619	0.618	0.618	0.618
28	0.855	0.854	0.852	0.850	0.850	0.850	0.849	0.849	0.849
30	1.11	1.12	1.13	1.14	1.14	1.14	1.14	1.14	1.14
32	1.43	1.44	1.47	1.49	1.50	1.51	1.51	1.51	1.51
34	1.82	1.82	1.87	1.92	1.95	1.96	1.97	1.97	1.97
36	2.29	2.27	2.35	2.43	2.48	2.51	2.52	2.52	2.53
38	2.85	2.80	2.91	3.03	3.12	3.16	3.18	3.20	3.20
40	3.52	3.42	3.55	3.74	3.87	3.94	3.98	4.00	4.01
42	4.32	4.16	4.30	4.55	4.74	4.86	4.91	4.95	4.96
44	5.26	5.01	5.16	5.48	5.75	5.92	6.01	6.06	6.09
46	6.36	6.01	6.14	6.53	6.90	7.14	7.28	7.36	7.40
48	7.64	7.16	7.27	7.73	8.21	8.55	8.75	8.86	8.92
50	9.11	8.50	8.55	9.07	9.68	10.14	10.42	10.58	10.66
52	10.8	10.0	10.0	10.6	11.3	11.9	12.3	12.5	12.7
54	12.8	11.8	11.7	12.3	13.2	13.9	14.5	14.8	14.9
56	15.0	13.8	13.6	14.2	15.2	16.2	16.8	17.3	17.5
58	17.5	16.0	15.7	16.3	17.5	18.6	19.5	20.1	20.4
60	20.3	18.5	18.1	18.7	20.0	21.4	22.5	23.2	23.6
62	23.5	21.4	20.8	21.4	22.8	24.4	25.7	26.7	27.3
64	27.0	24.6	23.8	24.4	25.8	27.7	29.3	30.5	31.3
66	31.0	28.1	27.1	27.6	29.2	31.3	33.2	34.7	35.7
68	35.4	32.1	30.9	31.3	32.9	35.2	37.5	39.3	40.5
70	40.3	36.5	35.0	35.3	37.0	39.5	42.1	44.3	45.9
72	45.7	41.4	39.6	39.8	41.5	44.2	47.2	49.8	51.7
74	51.7	46.7	44.6	44.7	46.4	49.3	52.7	55.7	58.0
76	58.3	52.6	50.2	50.1	51.8	54.9	58.6	62.1	64.8
78	65.5	59.1	56.3	56.1	57.7	60.9	65.0	69.0	72.3
80	73.4	66.2	62.9	62.5	64.2	67.5	71.9	76.4	80.2
82	82.0	73.9	70.2	69.6	71.2	74.7	79.4	84.4	88.8
84	91.4	82.4	78.1	77.3	78.9	82.4	87.4	93.0	98.1
86	102.	92.	87.	86.	87.	91.	96.	102.	108.
88	113.	102.	96.	95.	96.	100.	105.	112.	119.
90	125.	112.	106.	105.	106.	110.	115.	123.	130.

Tabla 3-15

Factores equivalentes de carga para pavimentos rígidos, ejes tridem, $P_t = 2,5$

Carga p/eje (kips)	Espesor de losa D (en pulgadas)								
	6	7	8	9	10	11	12	13	14
2	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001
4	0.0003	0.0003	0.0003	0.0003	0.0003	0.0003	0.0003	0.0003	0.0003
6	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001
8	0.003	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002
10	0.006	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005
12	0.011	0.010	0.010	0.009	0.009	0.009	0.009	0.009	0.009
14	0.020	0.018	0.017	0.017	0.016	0.016	0.016	0.016	0.016
16	0.033	0.030	0.029	0.028	0.027	0.027	0.027	0.027	0.027
18	0.053	0.048	0.045	0.044	0.044	0.043	0.043	0.043	0.043
20	0.080	0.073	0.069	0.067	0.066	0.066	0.066	0.066	0.066
22	0.116	0.107	0.101	0.099	0.098	0.097	0.097	0.097	0.097
24	0.163	0.151	0.144	0.141	0.139	0.139	0.138	0.138	0.138
26	0.222	0.209	0.200	0.195	0.194	0.193	0.192	0.192	0.192
28	0.295	0.281	0.271	0.265	0.263	0.262	0.262	0.262	0.262
30	0.384	0.371	0.359	0.354	0.351	0.350	0.349	0.349	0.349
32	0.490	0.480	0.468	0.463	0.460	0.459	0.458	0.458	0.458
34	0.616	0.609	0.601	0.596	0.594	0.593	0.592	0.592	0.592
36	0.765	0.762	0.759	0.757	0.756	0.755	0.755	0.755	0.755
38	0.939	0.941	0.946	0.948	0.950	0.951	0.951	0.951	0.951
40	1.14	1.15	1.16	1.17	1.18	1.18	1.18	1.18	1.18
42	1.38	1.38	1.41	1.44	1.45	1.46	1.46	1.46	1.46
44	1.65	1.65	1.70	1.74	1.77	1.78	1.78	1.78	1.79
46	1.97	1.96	2.03	2.09	2.13	2.15	2.16	2.16	2.16
48	2.34	2.31	2.40	2.49	2.55	2.58	2.59	2.60	2.60
50	2.76	2.71	2.81	2.94	3.02	3.07	3.09	3.10	3.11
52	3.24	3.15	3.27	3.44	3.56	3.62	3.66	3.68	3.68
54	3.79	3.66	3.79	4.00	4.16	4.26	4.30	4.33	4.34
56	4.41	4.23	4.37	4.63	4.84	4.97	5.03	5.07	5.09
58	5.12	4.87	5.00	5.32	5.59	5.76	5.85	5.90	5.93
60	5.91	5.59	5.71	6.08	6.42	6.64	6.77	6.84	6.87
62	6.80	6.39	6.50	6.91	7.33	7.62	7.79	7.88	7.93
64	7.79	7.29	7.37	7.82	8.33	8.70	8.92	9.04	9.11
66	8.90	8.28	8.33	8.03	9.42	9.88	10.17	10.33	10.42
68	10.1	9.4	9.4	9.9	10.6	11.2	11.5	11.7	11.9
70	11.5	10.6	10.6	11.1	11.9	12.6	13.0	13.3	13.5
72	13.0	12.0	11.8	12.4	13.3	14.1	14.7	15.0	15.2
74	14.6	13.5	13.2	13.8	14.8	15.8	16.5	16.9	17.1
76	16.5	15.1	14.8	15.4	16.5	17.6	18.4	18.9	19.2
78	18.5	16.9	16.5	17.1	18.2	19.5	20.5	21.1	21.5
80	20.6	18.8	18.3	18.9	20.2	21.6	22.7	23.5	24.0
82	23.0	21.0	20.3	20.9	22.2	23.8	25.2	26.1	26.7
84	25.6	23.3	22.5	23.1	24.5	26.2	27.8	28.9	29.6
86	28.4	25.8	24.9	25.4	26.9	28.8	30.5	31.9	32.8
88	31.5	28.6	27.5	27.9	29.4	31.5	33.5	35.1	36.1
90	34.8	31.5	30.7	30.7	32.2	34.4	36.7	38.5	39.8

Tabla 3-16

Factores equivalentes de carga para pavimentos rígidos, ejes simples, P_t = 3,0

Carga p/eje (kips)	Espesor de losa D (en pulgadas)								
	6	7	8	9	10	11	12	13	14
2	0.0003	0.0002	0.0002	0.0002	0.0002	0.0002	0.0002	0.0002	0.0002
4	0.003	0.003	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002
6	0.014	0.012	0.011	0.010	0.010	0.010	0.010	0.010	0.010
8	0.045	0.038	0.034	0.033	0.032	0.032	0.032	0.032	0.032
10	0.111	0.095	0.087	0.083	0.081	0.081	0.080	0.080	0.080
12	0.228	0.202	0.186	0.179	0.176	0.174	0.174	0.174	0.173
14	0.408	0.378	0.355	0.344	0.340	0.337	0.337	0.337	0.337
16	0.660	0.640	0.619	0.608	0.603	0.600	0.599	0.599	0.599
18	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
20	1.46	1.47	1.52	1.55	1.57	1.58	1.58	1.59	1.59
22	2.07	2.06	2.18	2.29	2.35	2.38	2.40	2.41	2.41
24	2.90	2.81	3.00	3.23	3.38	3.47	3.51	2.53	3.54
26	4.00	3.77	4.01	4.40	4.70	4.87	4.96	5.01	5.04
28	5.43	4.99	5.23	5.80	6.31	6.65	6.83	6.93	6.98
30	7.27	6.53	6.72	7.46	8.25	8.83	9.17	9.36	9.46
32	9.59	8.47	8.53	9.42	10.54	11.44	12.03	12.37	12.56
34	12.5	10.9	10.7	11.7	13.2	14.5	15.5	16.0	16.4
36	16.0	13.8	13.4	14.4	16.2	18.1	19.5	20.4	21.0
38	20.4	17.4	16.7	17.7	19.8	22.2	24.2	25.6	26.4
40	25.6	21.8	20.6	21.5	23.8	26.8	29.5	31.5	32.9
42	31.8	26.9	25.3	26.0	28.5	32.0	35.5	38.4	40.3
44	39.2	33.1	30.8	31.3	33.9	37.9	42.3	46.1	48.8
46	47.8	40.3	37.2	37.5	40.1	44.5	49.8	54.7	58.5
48	57.9	48.6	44.8	44.7	47.3	52.1	48.2	64.3	69.4
50	69.6	58.4	53.6	53.1	55.6	60.6	67.6	75.0	81.4

Tabla 3-17

Factores equivalentes de carga para pavimentos rígidos, ejes tándem, P_t = 3,0

Carga p/eje (kips)	Espesor de losa D (en pulgadas)								
	6	7	8	9	10	11	12	13	14
2	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001
4	0.0007	0.0006	0.0005	0.0005	0.0005	0.0005	0.0005	0.0005	0.0005
6	0.003	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002
8	0.008	0.006	0.006	0.006	0.006	0.006	0.006	0.006	0.006
10	0.018	0.015	0.013	0.013	0.013	0.012	0.012	0.012	0.012
12	0.036	0.030	0.027	0.026	0.026	0.025	0.025	0.025	0.025
14	0.066	0.056	0.050	0.048	0.047	0.047	0.047	0.047	0.047
16	0.111	0.095	0.087	0.083	0.081	0.081	0.081	0.081	0.080
18	0.174	0.153	0.140	0.135	0.132	0.131	0.131	0.131	0.131
20	0.260	0.234	0.217	0.209	0.205	0.204	0.203	0.203	0.203
22	0.368	0.341	0.321	0.311	0.307	0.305	0.304	0.303	0.303
24	0.502	0.479	0.458	0.447	0.443	0.440	0.440	0.439	0.439
26	0.664	0.651	0.634	0.625	0.621	0.619	0.618	0.618	0.618
28	0.859	0.857	0.853	0.851	0.850	0.850	0.850	0.849	0.849
30	1.09	1.10	1.12	1.13	1.14	1.14	1.14	1.14	1.14
32	1.38	1.38	1.44	1.47	1.49	1.50	1.51	1.51	1.51
34	1.72	1.71	1.80	1.88	1.93	1.95	1.96	1.97	1.97
36	2.13	2.10	2.23	2.36	2.45	2.49	2.51	2.52	2.52
38	2.62	2.54	2.71	2.92	3.06	3.13	3.17	3.19	3.20
40	3.21	3.05	3.26	3.55	3.76	3.89	3.95	3.98	4.00
42	3.90	3.65	3.87	4.26	4.58	4.77	4.87	4.92	4.95
44	4.72	4.35	4.57	5.06	5.50	5.78	5.94	6.02	6.06
46	5.68	5.16	5.36	5.95	6.54	6.94	7.17	7.29	7.36
48	6.80	6.10	6.25	6.93	7.69	8.24	8.57	8.76	8.86
50	8.09	7.17	7.26	8.03	8.96	9.70	10.17	10.43	10.58
52	9.57	8.41	8.40	9.24	10.36	11.32	11.96	12.33	12.54
54	11.3	9.8	9.7	10.6	11.9	13.1	14.0	14.5	14.8
56	13.2	11.4	11.2	12.1	13.6	15.1	16.2	16.9	17.3
58	15.4	13.2	12.8	13.7	15.4	17.2	18.6	19.5	30.1
60	17.9	15.3	14.7	15.6	17.4	19.5	21.3	22.5	23.2
62	20.6	17.6	16.8	17.6	19.6	22.0	24.1	25.7	26.6
64	23.7	20.2	19.1	19.9	22.0	24.7	27.3	29.2	30.4
66	27.2	23.1	21.7	22.4	24.6	27.6	30.6	33.0	34.6
68	31.1	26.3	24.6	25.2	27.4	30.8	34.3	37.1	39.2
70	35.4	29.8	27.8	28.2	30.6	34.2	38.2	41.6	44.1
72	40.1	33.8	31.3	31.6	34.0	37.9	42.3	46.4	49.4
74	45.3	38.1	35.2	35.4	37.7	41.8	46.8	51.5	55.2
76	51.1	42.9	39.5	39.5	41.8	46.1	51.5	56.9	61.3
78	57.4	48.2	44.3	44.0	46.3	50.7	56.5	62.7	67.9
80	64.3	53.9	49.4	48.9	51.1	55.8	62.1	68.9	74.9
82	71.8	60.2	55.1	54.3	56.5	61.2	67.9	75.5	82.4
84	80.0	67.0	61.2	60.2	62.2	67.0	74.2	82.4	90.3
86	89.0	74.5	67.9	66.5	68.5	73.4	80.8	89.8	98.7
88	98.7	82.5	75.2	73.5	75.3	80.2	88.0	97.7	107.5
90	109.	91.	83.	81.	83.	88.	96.	106.	117.

Tabla 3-18

Factores equivalentes de carga para pavimentos rígidos, ejes tridem, P_t = 3,0

Carga p/eje (kips)	Espesor de losa D (en pulgadas)								
	6	7	8	9	10	11	12	13	14
2	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001
4	0.0004	0.0003	0.0003	0.0003	0.0003	0.0003	0.0003	0.0003	0.0003
6	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001
8	0.003	0.003	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002
10	0.007	0.006	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005
12	0.013	0.011	0.010	0.009	0.009	0.009	0.009	0.009	0.009
14	0.023	0.02	0.018	0.017	0.017	0.016	0.016	0.016	0.016
16	0.039	0.033	0.030	0.028	0.028	0.027	0.027	0.027	0.027
18	0.061	0.052	0.047	0.045	0.044	0.044	0.043	0.043	0.043
20	0.091	0.078	0.071	0.068	0.067	0.066	0.066	0.066	0.066
22	0.132	0.114	0.104	0.100	0.098	0.097	0.097	0.097	0.097
24	0.183	0.161	0.148	0.143	0.140	0.139	0.139	0.138	0.138
26	0.246	0.221	0.205	0.198	0.195	0.193	0.193	0.192	0.192
28	0.322	0.296	0.277	0.268	0.265	0.263	0.262	0.262	0.262
30	0.411	0.387	0.367	0.357	0.353	0.351	0.350	0.349	0.349
32	0.515	0.495	0.476	0.466	0.462	0.460	0.459	0.458	0.458
34	0.634	0.622	0.607	0.599	0.595	0.594	0.593	0.592	0.592
36	0.772	0.768	0.762	0.759	0.756	0.756	0.755	0.755	0.755
38	0.930	0.934	0.942	0.947	0.949	0.950	0.951	0.951	0.951
40	1.11	1.12	1.15	1.17	1.18	1.18	1.18	1.18	1.18
42	1.32	1.33	1.38	1.42	1.44	1.45	1.46	1.46	1.46
44	1.56	1.56	1.64	1.71	1.75	1.77	1.78	1.78	1.78
46	1.84	1.83	1.94	2.04	2.10	2.14	2.15	2.16	2.16
48	2.16	2.12	2.26	2.41	2.51	2.56	2.58	2.59	2.60
50	2.53	2.45	2.61	2.82	2.96	3.03	3.07	3.09	3.10
52	2.95	2.82	3.01	3.27	3.47	3.58	3.63	3.66	3.68
54	3.43	3.23	3.43	3.77	4.03	4.18	4.27	4.31	4.33
56	3.98	3.70	3.90	4.31	4.65	4.86	4.98	5.04	5.07
58	4.59	4.22	4.42	4.90	5.34	5.62	5.78	5.86	5.90
60	5.28	4.80	4.99	5.54	6.08	6.45	6.66	6.78	6.84
62	6.06	5.45	5.61	6.23	6.89	7.36	7.64	7.80	7.88
64	6.92	6.18	6.29	6.98	7.76	8.36	8.72	8.93	9.04
66	7.89	6.98	7.05	7.78	8.70	9.44	9.91	10.18	10.33
68	8.96	7.88	7.87	8.66	9.71	10.61	11.20	11.55	11.75
70	10.2	8.9	8.8	9.6	10.8	11.9	12.6	13.1	13.3
72	11.5	10.0	9.8	10.6	12.0	13.2	14.1	14.7	15.0
74	12.9	11.2	10.9	11.7	13.2	14.7	15.8	16.5	16.9
76	14.5	12.5	12.1	12.9	14.5	16.2	17.5	18.4	18.9
78	16.2	13.9	13.4	14.2	15.9	17.8	19.4	20.5	21.1
80	18.2	15.5	14.8	15.6	17.4	19.6	21.4	22.7	23.5
82	20.2	17.2	16.4	17.2	19.1	21.4	23.5	25.1	26.1
84	22.5	19.1	18.1	18.8	20.8	23.4	25.8	27.6	28.8
86	25.0	21.2	19.9	20.6	22.6	25.5	28.2	30.4	31.8
88	27.6	23.4	21.9	22.5	24.6	27.7	30.7	33.2	35.0
90	30.5	25.8	24.1	24.6	26.8	30.0	33.4	36.3	38.3

3.3 Determinación y cálculo de ejes equivalentes de diseño

Para la determinación y cálculo de los ejes equivalentes se requiere el uso de factores de camión para cada clase particular de vehículo, principalmente para camiones pesados. Esto debe hacerse usando los pesos límites de cada vehículo conforme se establece en la tabla 3-19.

Tabla 3-19
Límite de peso por eje

Tipo de Vehículo	Tipo de eje del tractor				Tipo de eje del semiremolque			Total Toneladas
	Eje simple direccional	Eje de tracción			Eje de arrastre			
		Eje Simple	Doble rueda	Triple rueda	Eje Simple	Doble rueda	Triple rueda	
C2	5.00	10.00						15.00
C3	5.00		16.50					21.50
C4	5.00			20.00				25.00
T2-S1	5.00	9.00			9.00			23.00
T2-S2	5.00	9.00				16.00		30.00
T2-S3	5.00	9.00					20.00	34.00
T3-S1	5.00		16.00		9.00			30.00
T3-S2	5.00		16.00			16.00		37.00
T3-S3	5.00		16.00				20.00	41.00
Otros	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	Variable

Fuente: Acuerdo Centroamericano sobre Circulación por Carreteras, SIECA, 2000. Resolución 02-01 COMITRAN XXIII.

Seguidamente en la tabla 3-20, se tiene el porcentaje de la tasa anual de crecimiento vehicular, que se usará y el período de diseño de la estructura de pavimento, lo que nos da el factor de crecimiento de tránsito. Hay que tener presente que el porcentaje de la tasa anual de crecimiento de vehículos, se puede cambiar utilizando diferentes porcentajes, dependiendo del tipo de vehículo que se considere que va a aumentar o disminuir más que los otros.

Al tomar en cuenta lo escrito en el párrafo subrayado del numeral 3.1 de esta sección, se deduce lo importante que es el tener un buen conteo del tránsito de la carretera en estudio.

Tabla 3-20
Factores de crecimiento de tránsito

Período de análisis (años)	Factor sin Crecimiento	Tasa de crecimiento anual (g) (en %)						
		2	4	5	6	7	8	10
1	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
2	2.0	2.02	2.04	2.05	2.06	2.07	2.08	2.10
3	3.0	3.06	3.12	3.15	3.18	3.21	3.25	3.31
4	4.0	4.12	4.25	4.31	4.37	4.44	4.51	4.64
5	5.0	5.20	5.42	5.53	5.64	5.75	5.87	6.11
6	6.0	6.31	6.63	6.80	6.98	7.15	7.34	7.72
7	7.0	7.43	7.90	8.14	8.39	8.65	8.92	9.49
8	8.0	8.58	9.21	9.55	9.90	10.26	10.64	11.44
9	9.0	9.75	10.58	11.03	11.49	11.98	12.49	13.58
10	10.0	10.95	12.01	12.58	13.18	13.82	14.49	15.94
11	11.0	12.17	13.49	14.21	14.97	15.78	16.65	18.53
12	12.0	13.41	15.03	15.92	16.87	17.89	18.98	21.38
13	13.0	14.68	16.63	17.71	18.88	20.14	21.50	24.52
14	14.0	15.97	18.29	19.16	21.01	22.55	24.21	27.97
15	15.0	17.29	20.02	21.58	23.28	25.13	27.15	31.77
16	16.0	18.64	21.82	23.66	25.67	27.89	30.32	35.95
17	17.0	20.01	23.70	25.84	28.21	30.84	33.75	40.55
18	18.0	21.41	25.65	28.13	30.91	34.00	37.45	45.60
19	19.0	22.84	27.67	30.54	33.76	37.38	41.45	51.16
20	20.0	24.30	29.78	33.06	36.79	41.00	45.76	57.28
25	25.0	32.03	41.65	47.73	54.86	63.25	73.11	98.35
30	30.0	40.57	56.08	66.44	79.06	94.46	113.28	164.49
35	35.0	49.99	73.65	90.32	111.43	138.24	172.32	271.02

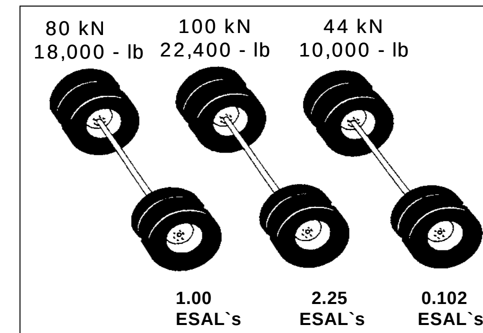
Tabla D-20 AASHTO Guía para el diseño de estructuras de pavimento, 1,993

A continuación se usa la hoja de trabajo HT-01 para el cálculo de ESAL´s, en la cual se describen los valores particulares del factor de camión en función del factor de carga equivalente; Dichos valores son los que se colocan en la columna “D” de la hoja de trabajo HT – 02.

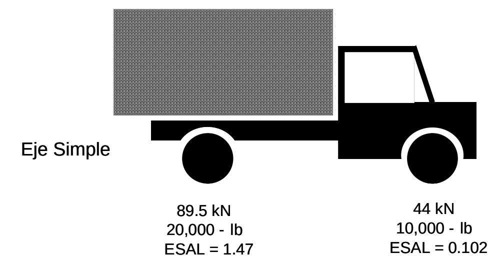
Hoja de trabajo HT - 01
Ejemplo para cálculo del factor de carga equivalente

Figura 3-2
Factores de equivalencia de la carga

SN = 4, Índice de Serviciabilidad final = 2.5

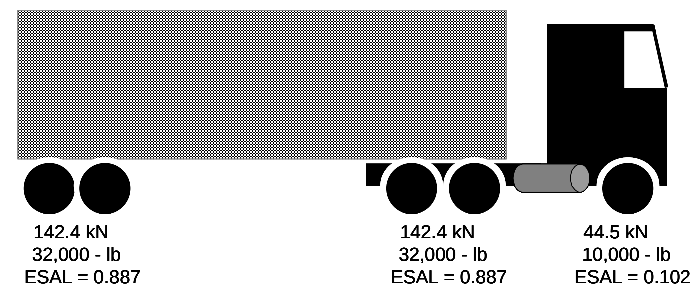


Ejes simples



Peso Bruto
133.5 kN 30,000 - lb
Factor de Camión
1.572

Eje Tándem



Peso Bruto
239.3 kN 74,000 - lb
Factor de Camión
1.876

Para determinar los ESAL´s de diseño, se hará uso de la siguiente hoja de trabajo.

Hoja de trabajo HT - 02
Ejemplo para calcular el equivalente de 18 Kips en carga de ejes simples

Proyecto	______________	Período de diseño	15
No. De prueba	______________	SN o D	4
		Índice de serviciabilidad final = P_t	2.5

Tipo de Vehículo	Cantidad de Vehículos diarios **"A"**	Factor de crecimiento **"B"**	Tránsito de diseño **"C"**	ESAL´s Factor **"D"**	ESAL´s de diseño **"E"**
Vehículos sencillos		**4%**			
Autos	500	20.02	3,653,650	0.0002	731
Autobuses	125	20.02	913,413	1.1005	1,005,210
Camiones eje simple		**2%**			
Pick-ups	250	17.29	1,577,713	0.0004	631
Otros Vehículos 2 ejes y cuatro ruedas (agricolas)	25	17.29	157,771	0.0132	2,083
Camiones de 2 ejes, 6 ruedas, camiones de 3 ejes o más	80	17.29	504,868	1.972	995,599.7
Camiones tipo trailer eje compuesto		**6%**			
Semiremolque (3 ejes)	450	21.58	3,544,515	1.8760	6,649,510
Semiremolque (4 ejes)	45	21.58	354,452	2.7630	979,349
Semiremolque (5 o más ejes)	25	21.58	196,918	3.6500	718,749
		2%			
Camión acoplado (5 ejes)	10	17.29	63,109	3.6500	230,346
Camión acoplado (6 o más ejes)	5	17.29	31,554	4.5370	143,162
TOTAL VEHICULOS	**1,515**		**ESAL´s de diseño**		**10,725,371**

Factor de Dirección: 0.5[7]
Factor de Carril: 0.9[8]
ESAL´s por carril de tránsito: 0.5 x 0.9 x 10,725,371 = 4,826,417

---

(7) Referencia: Numeral 3.4
(8) Referencia: Numeral 3.5

En la columna **"A"** se pondrá la **cantidad diaria** de cada tipo de vehículo especificado y del cual se tenga el conteo correspondiente.

En la columna **"B"** se colocará el correspondiente **factor de crecimiento** para cada tipo de vehículo, el cual depende de la **tasa de crecimiento** asumida para cada tipo de vehículo y el período de diseño considerado, cada tipo de vehículo puede tener una tasa de crecimiento distinta, ya que no todos los tipos de vehículos tienen que crecer a la misma tasa, según la tabla 3-20.

En la columna **"C"** se coloca el producto de las columnas "A" y "B" **multiplicado por 365** (días del año).

En la columna **"D"** se coloca el factor de ESAL[9], que depende de cada peso y configuración o tipo de camión (ejes simples, tandem o tridem) y los valores **asumidos** de índice de serviciabilidad final y el número estructural (SN para pavimentos flexibles) o espesor de losa para pavimentos rígidos, conforme la hoja de trabajo HT - 01.

La columna **"E"** es el producto de la "C" por la "D" , y la suma de esta columna "E" es el número total de ESAL´s para el diseño del pavimento considerado y el cual debe afectarse por el factor de distribución por dirección y el factor de distribución por carril.

3.4 Factor de distribución por dirección

Es el factor del total del flujo vehicular censado, en la mayoría de los casos este valor es de 0.5; ya que la mitad de los vehículos va en una dirección y la otra mitad en la otra dirección. Puede darse el caso de ser mayor en una dirección que en la otra, lo cual puede deducirse del conteo de tránsito efectuado.

Lo más importante de esto, será la diferencia de peso entre los vehículos que van en una y en otra dirección; como puede suceder por la cercanía de una fábrica, puerto, etc. Ver tabla 3-21

[9] Ver Hoja de trabajo HT - 01, Factores de equivalencia de carga

Tabla 3-21
Factor de distribución por dirección

Número de carriles en ambas direcciones	LD[10]
2	50
4	45
6 o más	40

Fuente: Guía para el diseño de estructuras de pavimento, AASHTO, 1,993

3.5 Factor de distribución por carril

Se define por el carril de diseño aquel que recibe el mayor número de ESAL´s. Para un camino de dos carriles, cualquiera de las dos puede ser el carril de diseño, ya que el tránsito por dirección forzosamente se canaliza por ese carril. Para caminos de varios carriles, el de diseño será el externo, por el hecho de que los vehículos pesados van en ese carril, ver tabla 3-22.

Tabla 3-22
Factor de distribución por carril

Número de carriles en una sola dirección	LC[11]
1	1.00
2	0.80 – 1.00
3	0.60 – 0.80
4	0.50 – 0.75

Fuente: Guía para el diseño de estructuras de pavimento, AASHTO, 1,993

En las tablas 3-21 y 3-22, de existir un estudio especifico para el proyecto, deberá usar los valores obtenidos en el mismo.

En la tabla 3-23 se dan valores de equivalencia entre las cargas sobre un eje, entre kN y lbs.

[10] Porcentaje de camiones en el carril de diseño
[11] Porcentaje de camiones en el carril de diseño

Tabla 3.23

VALORES EQUIVALENTES ENTRE kN y lb

Eje de carga bruta		Eje de carga bruta		Eje de carga bruta		Eje de carga bruta	
kN	lb	kN	lb	kN	lb	kN	lb
4.5	**1000**	63.4	14250	122.4	27500	181.3	40750
5.6	1250	64.5	14500	123.5	27750	182.5	**41000**
6.7	1500	65.6	14750	124.6	**28000**	183.6	41250
7.8	1750	66.8	**15000**	125.7	28250	184.7	41500
8.9	**2000**	67.9	15250	126.8	28500	185.8	41750
10.0	2250	69.0	15500	127.9	28750	186.9	**42000**
11.1	2500	70.1	15750	129.1	**29000**	188.0	42250
12.2	2750	71.2	**16000**	130.2	29250	189.1	42500
13.4	**3000**	72.3	16250	131.3	29500	190.2	42750
14.5	3250	73.4	16500	132.4	29750	191.4	**43000**
15.6	3500	74.5	16750	133.5	**30000**	192.5	43250
16.7	3750	75.7	**17000**	134.6	30250	193.6	43500
17.8	**4000**	76.8	17250	135.7	30500	194.7	43750
18.9	4250	77.9	17500	136.8	30750	195.8	**44000**
20.0	4500	79.0	17750	138.0	**31000**	196.9	44250
21.1	4750	80.1	**18000**	139.1	31250	198.0	44500
22.3	**5000**	81.2	18250	140.2	31500	199.1	44750
23.4	5250	82.3	18500	141.3	31750	200.3	**45000**
24.5	5500	83.4	18750	142.4	**32000**	201.4	45250
25.6	5750	84.6	**19000**	143.5	32250	202.5	45500
26.7	**6000**	85.7	19250	144.6	32500	203.6	45750
27.8	6250	86.8	19500	145.7	32750	204.7	**46000**
28.9	6500	87.9	19750	146.9	**33000**	205.8	46250
30.0	6750	89.0	**20000**	148.0	33250	206.9	46500
31.2	**7000**	90.1	20250	149.1	33500	208.0	46750
32.3	7250	91.2	20500	150.2	33750	209.2	**47000**
33.4	7500	92.3	20750	151.3	**34000**	210.3	47250
34.5	7750	93.5	**21000**	152.4	34250	211.4	47500
35.6	**8000**	94.6	21250	153.5	34500	212.5	47750
36.7	8250	95.7	21500	154.6	34750	213.6	**48000**
37.8	8500	96.8	21750	155.8	**35000**	214.7	48250
38.9	8750	97.9	**22000**	156.9	35250	215.8	48500
40.1	**9000**	99.0	22250	158.0	35500	216.9	48750
41.2	9250	100.1	22500	159.1	35750	218.1	**49000**
42.3	9500	101.2	22750	160.2	**36000**	219.2	49250
43.4	9750	102.4	**23000**	161.3	36250	220.3	49500
44.5	**10000**	103.5	23250	162.4	36500	221.4	49750
45.6	10250	104.6	23500	163.5	36750	222.5	**50000**
46.7	10500	105.7	23750	164.7	**37000**	223.6	50250
47.8	10750	106.8	**24000**	165.8	37250	224.7	50500
49.0	**11000**	107.9	24250	166.9	37500	225.8	50750
50.1	11250	109.0	24500	168.0	37750	227.0	**51000**
51.2	11500	110.1	24750	169.1	**38000**	228.1	51250
52.3	11750	111.3	**25000**	170.2	38250	229.2	51500
53.4	**12000**	112.4	25250	171.3	38500	230.3	51750
54.5	12250	113.5	25500	172.4	38750	231.4	**52000**
55.6	12500	114.6	25750	173.6	**39000**	232.5	52250
56.7	12750	115.7	**26000**	174.7	39250	233.6	52500
57.9	**13000**	116.8	26250	175.8	39500	234.7	52750
59.0	13250	117.9	26500	176.9	39750	235.9	**53000**
60.1	13500	119.0	26750	178.0	**40000**	237.0	53250
61.2	13750	120.2	**27000**	179.1	40250	238.1	53500
62.3	**14000**	121.3	27250	180.2	40500	239.2	53750

VALORES EQUIVALENTES ENTRE kN y lb (Continuación)

Eje de carga bruta		Eje de carga bruta		Eje de carga bruta		Eje de carga bruta	
kN	lb	kN	lb	kN	lb	kN	lb
240.3	**54000**	299.3	67250	358.2	80500	417.2	93750
241.4	54250	300.4	67500	359.3	80750	418.3	**94000**
242.5	54500	301.5	67750	360.5	**81000**	419.4	94250
243.6	54750	302.6	**68000**	361.6	81250	420.5	94500
244.8	**55000**	303.7	68250	362.7	81500	421.6	94750
245.9	55250	304.8	68500	363.8	81750	422.8	**95000**
247.0	55500	305.9	68750	364.9	**82000**	423.9	95250
248.1	55750	307.1	**69000**	366.0	82250	425.0	95500
249.2	**56000**	308.2	69250	367.1	82500	426.1	95750
250.3	56250	309.3	69500	368.2	82750	427.2	**96000**
251.4	56500	310.4	69750	369.4	**83000**	428.3	96250
252.5	56750	311.5	**70000**	370.5	83250	429.4	96500
253.7	**57000**	312.6	70250	371.6	83500	430.5	96750
254.8	57250	313.7	70500	372.7	83750	431.7	**97000**
255.9	57500	314.8	70750	373.8	**84000**	432.8	97250
257.0	57750	316.0	**71000**	374.9	84250	433.9	97500
258.1	**58000**	317.1	71250	376.0	84500	435.0	97750
259.2	58250	318.2	71500	377.1	84750	436.1	**98000**
260.3	58500	319.3	71750	378.3	**85000**	437.2	98250
261.4	58750	320.4	**72000**	379.4	85250	438.3	98500
262.6	**59000**	321.5	72250	380.5	85500	439.4	98750
263.7	59250	322.6	72500	381.6	85750	440.6	**99000**
264.8	59500	323.7	72750	382.7	**86000**	441.7	99250
265.9	59750	324.9	**73000**	383.8	86250	442.8	99500
267.0	**60000**	326.0	73250	384.9	86500	443.9	99750
268.1	60250	327.1	73500	386.0	86750	445.0	**100000**
269.2	60500	328.2	73750	387.2	**87000**	446.1	100250
270.3	60750	329.3	**74000**	388.3	87250	447.2	100500
271.5	**61000**	330.4	74250	389.4	87500	448.3	100750
272.6	61250	331.5	74500	390.5	87750	449.5	**101000**
273.7	61500	332.6	74750	391.6	**88000**	450.6	101250
274.8	61750	333.8	**75000**	392.7	88250	451.7	101500
275.9	**62000**	334.9	75250	393.8	88500	452.8	101750
277.0	62250	336.0	75500	394.9	88750	453.9	**102000**
278.1	62500	337.1	75750	396.1	**89000**	455.0	102250
279.2	62750	338.2	**76000**	397.2	89250	456.1	102500
280.4	**63000**	339.3	76250	398.3	89500	457.2	102750
281.5	63250	340.4	76500	399.4	89750	458.4	**103000**
282.6	63500	341.5	76750	400.5	**90000**	459.5	103250
283.7	63750	342.7	**77000**	401.6	90250	460.6	103500
284.8	**64000**	343.8	77250	402.7	90500	461.7	103750
285.9	64250	344.9	77500	403.8	90750	462.8	**104000**
287.0	64500	346.0	77750	405.0	**91000**	463.9	104250
288.1	64750	347.1	**78000**	406.1	91250	465.0	104500
289.3	**65000**	348.2	78250	407.2	91500	466.1	104750
290.4	65250	349.3	78500	408.3	91750	467.3	**105000**
291.5	65500	350.4	78750	409.4	**92000**	468.4	105250
292.6	65750	351.6	**79000**	410.5	92250	469.5	105500
293.7	**66000**	352.7	79250	411.6	92500	470.6	105750
294.8	66250	353.8	79500	412.7	92750	471.7	**106000**
295.9	66500	354.9	79750	413.9	**93000**	472.8	106250
297.0	66750	356.0	**80000**	415.0	93250	473.9	106500
298.2	**67000**	357.1	80250	416.1	93500	475.0	106750

Fuente: Generada por el Consultor

CAPÍTULO 4

EVALUACIÓN DE SUBRASANTES

Introducción

La Subrasante es la capa en la que se apoya la estructura del pavimento y la característica especial que define la propiedad de los materiales que componen la subrasante, se conoce como Módulo de Resiliencia (Mr).

Inicialmente cuando se comenzaron a efectuar los primeros diseños de pavimento, este concepto estaba basado en las propiedades de la subrasante tales como:

- Granulometría
- Plasticidad
- Clasificación de suelos
- Resistencia al corte
- Susceptibilidad a las variaciones de temperatura
- Drenaje

Posteriormente se tomaron en cuenta las propiedades básicas de la subrasante y se analizaron otro tipo de ensayos que permitieran conocer en mejor forma el comportamiento de estos suelos. Se efectuaron ensayos utilizando cargas estáticas o de baja velocidad de deformación tales como el CBR, ensayos de compresión simple. Estos se cambiaron por ensayos dinámicos y de repetición de cargas como el del módulo de resiliencia, que son pruebas que demuestran en mejor forma el comportamiento y lo que sucede debajo de los pavimentos en lo que respecta a tensiones y deformaciones.

Las propiedades fisico-mecánicas son las características utilizadas para la selección de los materiales, las especificaciones de construcción y el control de calidad.

La calidad de los suelos en el caso de las subrasantes, se puede relacionar con el módulo de resiliencia, módulo de Poisson[1], valor soporte del suelo (CBR) y el módulo de reacción de la subrasante.

4.1 Propiedades físico-mecánicas de los suelos para subrasante

La subrasante es definida como el suelo preparado y compactado para soportar la estructura de un sistema de pavimento.

Estas propiedades de los suelos que constituyen la subrasante, son las variables más importantes que se deben considerar al momento de diseñar una estructura de pavimento. Las propiedades físicas se mantienen invariables aunque se sometan a tratamientos tales como homogenización, compactación, etc., Sin embargo, ambas propiedades cambiarían cuando se realicen en ellos procedimientos de estabilización, a través de procesos de mezclas con otro materiales (cemento, cal, puzolanas, etc.) o mezclas con químicos.

Para conocer las propiedades de los suelos en un proyecto, es necesario tomar muestras en todo el desarrollo del mismo (calicatas), posteriormente en el laboratorio se determinarán sus propiedades:

- Granulometría
- Limites de Atterberg (líquido e índice plástico)
- Valor Soporte (CBR)
- Densidad (Proctor)
- Humedad

Con los datos obtenidos, se elabora un perfil estratigráfico en el cual se detallan los distintos tipos de suelos y su profundidad.

4.2 Clasificación de suelos

La clasificación de suelos es el indicador de las propiedades físico - mecánicas que tienen los suelos. La clasificación que mejor describe y determina las propiedades de un suelo a usarse como subrasante es la

[1] Módulo de Elasticidad

clasificación de AASHTO M-145; las primeras variables son: la granulometría y la plasticidad. En términos generales, un suelo conforme a su granulometría se clasifica así:

- **Grava:** de un tamaño menor a 76.2 mm (3¨) hasta tamiz No. 10 (2 mm)
- **Arena Gruesa:** de un tamaño menor a 2 mm hasta tamiz No. 40 (0.425 mm)
- **Arena Fina:** de un tamaño menor a 0.425 mm hasta tamiz No. 200 (0.075 mm)
- **Limos y Arcillas:** tamaños menores de 0.075 mm

Conforme AASHTO, un suelo fino es el que tiene más del 35% que pasa el tamiz No. 200 (0.075 mm), los cuales se clasifican como A-4, A-5, A-6 o A-7. Dos suelos considerados finos que tengan granulometrías similares, pueden llegar a tener propiedades diferentes dependiendo de su plasticidad, cualidad que se analiza en el suelo que pasa el tamiz No. 40; dichas propiedades de plasticidad, se analizan conforme las pruebas de límites de Atterberg, las cuales son:

- **Límite Líquido o LL[2]:** Es el estado de un suelo, cuando pasa de un estado plástico a un estado semilíquido.
- **Límite Plástico o LP[2]:** Es la frontera entre el estado plástico y el semisólido de un suelo.
- **Índice Plástico o IP[2]:** es la diferencia entre LL y LP, que nos indica la plasticidad del material.

De lo descrito anteriormente, se concluye que para los suelos gruesos, la propiedad más importante es la granulometría y para los suelos finos son los límites de Atterberg.

La relación entre la humedad y la densidad de un suelo compactado, es una situación muy importante que se requiere al analizar las propiedades del mismo. Para el efecto se desarrollaron los ensayos Proctor, AASHTO T-99 (estándar) y T-180 (modificado) y son los que permiten determinar la humedad óptima o sea la humedad ideal en la cual el suelo llega a su densidad máxima y a su vez alcanza sus

[2] Rico y del Castillo, La Ingeniería de Suelos en las vías terrestres, México, 1,992

mejores propiedades mecánicas. El valor de esta humedad óptima depende directamente de la cantidad de energía de compactación a la que se ha sometido el suelo; al ser mayor la energía de compactación, la humedad óptima será menor y la densidad seca será mayor.

4.3 Ensayos de suelos

Existen diferentes métodos para medir la resistencia de los suelos de la subrasante que han sido sometidos a cargas dinámicas de tránsito, entre los cuales están los siguientes:

- Relación de Valor Soporte de California (CBR, California Bearing Ratio)
- Valor de resistencia Hveem (Valor R)
- Ensayo de plato de carga (Valor k)
- Penetración dinámica con cono
- Módulo de resiliencia (Mr) para pavimentos flexibles
- Módulo de reacción (Mk) para pavimentos rígidos

a) Valor soporte California (CBR, AASHTO T-193)

En este ensayo, se mide la resistencia que opone un suelo a la penetración de un pistón de 3 plg². de área en una muestra de suelo de 6 plg. (15 cm) de diámetro y 5 plg. (12.5 cm) de altura, a una velocidad de 1.27 mm/min (0.5 plg./min). La fuerza necesaria para que el pistón penetre dentro del suelo se mide a determinados intervalos de penetración; estas fuerzas medidas, se comparan con las que se necesitan para producir iguales penetraciones en una muestra que sirve de patrón, la cual es piedra partida bien graduada; la definición del CBR es:

$$CBR = \frac{\text{Fuerza necesaria para producir una penetración de 2.5 mm en un suelo}}{\text{Fuerza necesaria para producir una penetración de 2.5mm en la muestra patrón}}$$

Relación que nos da un valor que se indica en porcentaje, el cual puede ser muy variable dependiendo de los suelos analizados; 2 a 4 % en arcillas plásticas hasta un 70 % o más en materiales granulares de buena calidad.

Todos los suelos, tanto finos como gruesos o sus mezclas, se compactan a diferentes contenidos de humedad tanto arriba como bajo de su humedad óptima. Las muestras elaboradas bajo estos procedimientos, se sumergen en agua durante un período mínimo de 96 horas, antes de proceder a su ensayo, con el objeto de simular las condiciones de saturación a las cuales van a estar sometidos los suelos como la subrasante de una carretera, y en esta forma, obtener los CBR´s de los suelos bajo las condiciones más críticas. En el ensayo y en inmersión, se colocan pesos sobre las muestras, con el objeto de simular las cargas tanto vehiculares, como de la estructura de pavimento, a las cuales van a estar sometidos los suelos de la subrasante.

El método del CBR para diseño de pavimentos, fue uno de los primeros en utilizarse y se basa principalmente en que a menor valor de CBR de la subrasante es necesario colocar mayores espesores en la estructura de pavimento para protegerlo de la frecuencia de las cargas de tránsito.

b) Valor de resistencia HVEEM (Valor R, AASHTO T-246)

Este ensayo consiste en preparar una muestra cilíndrica de 4” de diámetro y 2.5” de alto envuelta en una membrana y sometida a carga vertical sobre la sección completa de la muestra a una presión dada; con esto se mide la presión horizontal resultante, que es la que sirve para calcular el valor R, para lo cual se utiliza la siguiente formula:

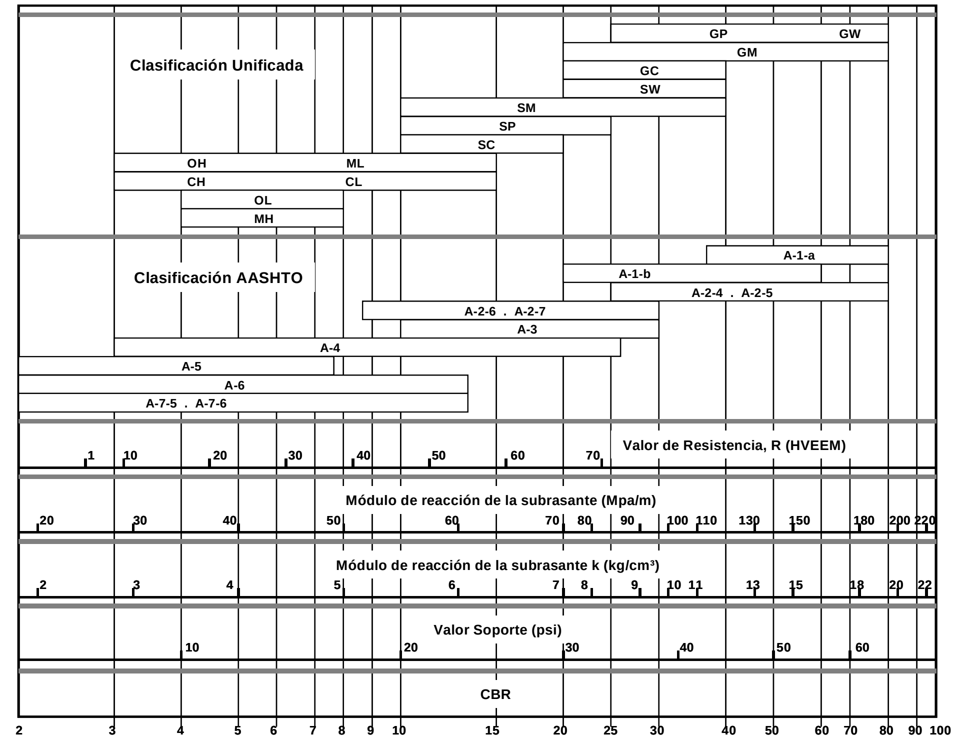
$$R = 100 - \frac{100}{\left(\frac{2.5\,(Px - 1)}{D \times Ph}\right) + 1}$$

En donde:

Px= Carga vertical aplicada
Ph= Presión horizontal en el manómetro
D= Desplazamiento horizontal de la muestra, registrado por el número de vueltas de la manivela para pasar de Ph a 7 kg/cm² (100 lbs/plg^2)

Los valores que se obtienen en estos ensayos de laboratorio, han sido correlacionados con los ensayos de CBR, según se muestra en la Figura 4-1.

Figura 4-1
Correlación aproximada entre la clasificación de los suelos y los diferentes ensayos



Fuente: Generado por el Consultor

c) Ensayo de plato de carga (Valor k, AASHTO T-222)

Este ensayo consiste en cargar un plato y medir la presión necesaria para producir una determinada deformación en el suelo. k es el cociente de dividir la presión (p) aplicada entre de la deformación (△) producida en el suelo.

$$k = p/\triangle$$

El valor k esta en función del plato de carga, ya que los de diámetro igual a 91.4 cm (36´´) se usan para pavimentos rígidos y los de 30.5 o 45.7 (12´´ a 18´´) para pavimentos flexibles.

d) Penetración dinámica PR con cono

Este ensayo sirve para medir en el terreno, la resistencia que tienen los materiales, tanto de estructuras de pavimento como de subrasantes. La operación consiste en hacer penetrar el cono dentro del pavimento o suelo, haciendo que una carga concentrada que funciona como martillo se deje caer repetidamente y se registre la penetración obtenida en cada caída en mm/golpe, denominado cada valor como tasa de penetración dinámica = PR (Penetration Rate)

El CBR esta relacionado con PR en la siguiente forma:

$$CBR = 405.3 / PR^{1.259} \quad \text{para conos a } 60°$$

$$CBR = 2.2 - 0.71 \log(DCP)^{1.3} \quad \text{para conos a } 30°$$

En donde:

PR = tasa de penetración en mm/golpe
DCP = tasa de penetración en plg/golpe

e) Módulo de resiliencia (Mr, AASHTO T – 294)

Este ensayo se desarrolló con el objeto de analizar la propiedad que tienen los materiales de comportarse bajo cargas dinámicas como las ruedas de tránsito. Una rueda al moverse transmite fuerzas dinámicas a todas las capas de pavimento incluyendo a la subrasante y como reacción a estas fuerzas, cada capa de pavimento se deforma; el resultado de estas fuerzas de reacción varia desde un valor muy bajo hasta su máximo, en un período muy breve, ya que está en función de la velocidad y peso del vehículo.

Este ensayo no es destructivo de la muestra, ya que estas no fallan durante el análisis. Dichas muestras son de forma cilíndrica y se colocan en una cámara triaxial, la cual permite ejercer innumerables

presiones de confinamiento a la muestra; con un dispositivo especial es posible aplicar cargas pulsantes de diferente magnitud y duración. En dicho ensayo se registra la deformación sufrida por la muestra.

En el ensayo se siguen las directrices de AASHTO T-294-92, el cual se divide en dos procedimientos, como sigue: a) para materiales tipo 1 o sea materiales granulares no ligados y subrasantes con menos del 70 % de pasa tamiz No. 10 y menos del 20 % pasa tamiz No. 200; y b) para materiales tipo 2 o sea subrasantes que no cumplen con los requerimientos de los tipo 1, tales como los suelos A-4, A-5, A-6, A-7 y en algunos casos los A-1-b, A-2 y A-3.

Este ensayo del módulo de resiliencia es más sensible a las propiedades de los suelos que otros ensayos de resistencia; una cualidad de este ensayo, es que al no romperse la muestra, ésta se puede someter a varios tipos de tensiones, lo que permite ahorrar tiempo en la preparación de otras, reduciendo errores. Las muestras se pueden preparar con diferentes contenidos de humedad, así como diferentes valores de compactación.

El contenido de humedad de un suelo tiene un fuerte impacto en el valor del módulo de resiliencia, ya que éste disminuye cuando se incrementa el contenido de humedad y obliga a hacer ajustes en los valores del módulo cuando el pavimento se satura en determinada época climatológica.

Aparte de la humedad, también la temperatura incide fuertemente, ya que existen zonas en las cuales los suelos son sometidos a períodos de congelación y deshielo; cuando esto sucede, se establece la relación de que a mayor número de períodos de congelación y deshielo también será mayor la pérdida del módulo de resiliencia.

Por el tipo de pruebas, es muy difícil dar valores típicos del módulo de resiliencia para cada uno de los tipos de suelo, ya que este valor no solo esta afectado por las diferentes formas de construcción sino que también por el tipo de suelo, granulometría, contenido de humedad, etc.. Es conveniente tratar de tener para cada área de construcción, el análisis de los suelos predominantes, con el objeto de que para otros proyectos se puedan correlacionar los módulos de resiliencia.

e.1) Módulo de resiliencia (Mr) para pavimentos flexibles

En el método de AASHTO (1986 y 1993), el módulo de resiliencia reemplaza al CBR como variable para caracterizar la subrasante, subbase y base. El módulo de resiliencia es una medida de la propiedad elástica de los suelos que reconoce a su vez las características no lineales de su comportamiento. El módulo de resiliencia puede ser usado directamente para el diseño de pavimentos flexibles, pero también puede ser convertido a un módulo de reacción de la subrasante (valor k) para el diseño de pavimentos rígidos. En este método de AASHTO se deben usar los valores medios resultantes de los ensayos de laboratorio, ya que la incertidumbre de la confiabilidad (R) debe tomarse en cuenta.

Como la humedad en la subrasante es variable en el transcurso del año, es necesario hacer el estudio de la variación del módulo de resiliencia (Mr) con respecto a la humedad y poder determinar un Mr promedio de diseño, para lo cual debe procederse así:

I. Es necesario efectuar ensayos de Mr en el laboratorio, sobre muestras de suelo que representen las condiciones de tensión y humedad que simulen bajo las cuales estarán en el transcurso del año. Con estas pruebas se establece una relación en el laboratorio, de las condiciones entre el módulo de resiliencia y la humedad.

II. Se determina el módulo de resiliencia en el lugar, por medio de las deflexiones obtenidas en los pavimentos; el módulo de resiliencia se ajusta para analizar las posibles diferencias que existen entre los resultados de laboratorio y los obtenidos en el lugar.

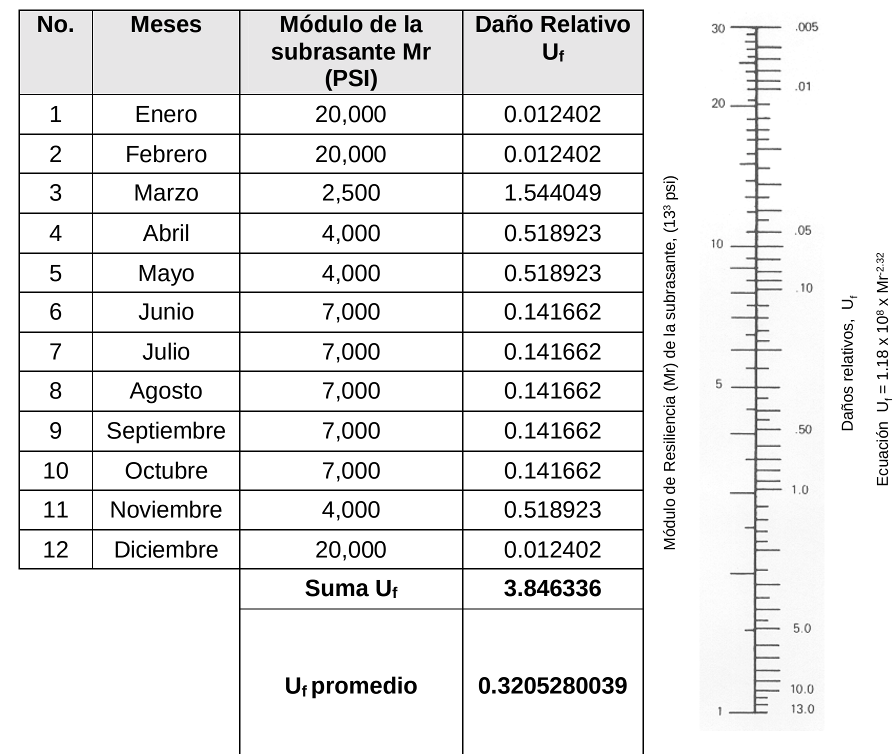
III. Es posible estimar valores normales (en época seca) del módulo de resiliencia, en función de las propiedades conocidas de los suelos y utilizar relaciones empíricas para calcular las variaciones conforme las épocas del año; El módulo de resiliencia en la época del deshielo es entre un 10 a un 20 %

menor que el Mr normal y cuando es suelo congelado éste varia hasta dos veces su valor, mayor que el normal.

Considerando lo anterior como base, el año se divide en períodos en los cuales el Módulo de resiliencia (Mr) se mantiene constante; dichos períodos no pueden ser menores de 15 días. Con cada valor del Módulo de resiliencia (Mr) se determina mediante la Figura 4-2 el valor del Daño Relativo (Uf) o puede usarse la siguiente fórmula:

$$Uf = 1.18 \times 10^{8} \times Mr^{-2.32}$$

Figura 4-2
Módulo efectivo de Resiliencia de la subrasante para pavimentos flexibles en función del criterio de serviciabilidad



No.	Meses	Módulo de la subrasante Mr (PSI)	Daño Relativo U_f
1	Enero	20,000	0.012402
2	Febrero	20,000	0.012402
3	Marzo	2,500	1.544049
4	Abril	4,000	0.518923
5	Mayo	4,000	0.518923
6	Junio	7,000	0.141662
7	Julio	7,000	0.141662
8	Agosto	7,000	0.141662
9	Septiembre	7,000	0.141662
10	Octubre	7,000	0.141662
11	Noviembre	4,000	0.518923
12	Diciembre	20,000	0.012402
		Suma U_f	**3.846336**
		U_f promedio	**0.3205280039**

Fuente: Guía para Diseño de Pavimentos, AASHTO, 1,993 y datos calculados, conforme la ecuación U_f

Seguidamente, se determina el daño relativo medio anual, para lo cual se suman todos los Uf y se divide entre el número de meses tomados en cuenta. El Módulo de resiliencia (Mr) de la subrasante es el correspondiente al Uf medio y éste será el valor a considerar para el diseño del pavimento flexible, siendo en el presente caso igual a 4,800.

Convenientemente se han reportado factores que pueden ser usados para estimar el módulo de resiliencia (Mr) con el CBR, el valor R y el índice de suelo. Se han dado correlaciones para encontrar el valor del módulo de resiliencia (Mr) como la siguiente relación:

$$Mr = B \times CBR$$

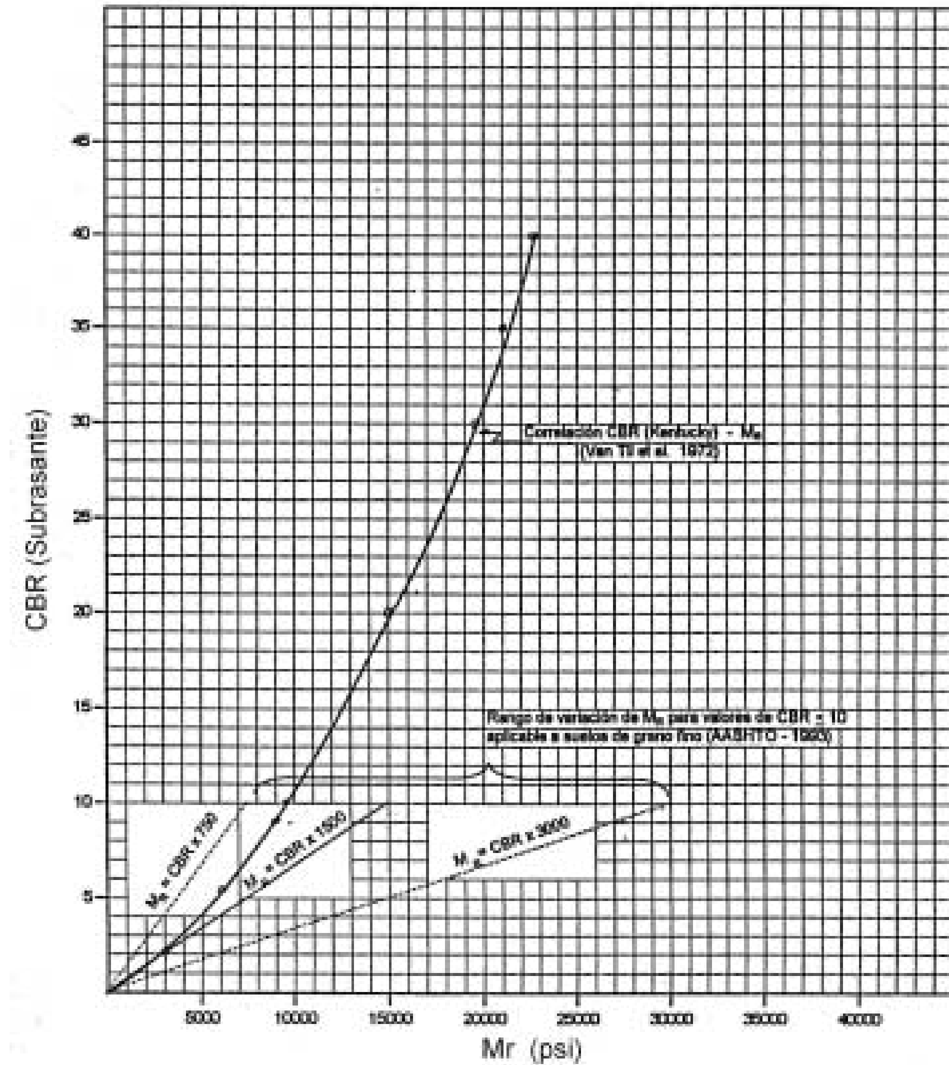
Este valor está desarrollado si el CBR < 10%, en donde B = 1500 pero este valor puede variar entre 750 y 3000 para un Mr en PSI, según Figura 4-3.

Con respecto al valor R (Resistencia) de Hveem se tiene:

$$Mr = A + B \times R$$

Si R < 20, A vale 1000, B vale 555, pero A puede variar entre 772 y 1155 y B entre 369 y 555.

Figura 4-3
Correlación CBR – Mr (Gráfica de Kentucky)



Fuente: Van Til, C. J. B. F. McCollough, B. A. Vallerga, and R. G. Hicks. 1,972. evaluation of AASHTO interim Guides for Design of Pavement structures. NCHRP report 128.

f) Módulo de reacción (Mk) para pavimentos rígidos

El módulo de reacción de la subrasante, sirve para el diseño de pavimentos rígidos; y para la determinación del valor efectivo de Mk, debe proceder así:

- Es conveniente asumir combinaciones de los diferentes datos que son necesarios para el cálculo del módulo de reacción de la subrasante, los cuales deberán ser considerados como sigue:

I. Tipo de Subbases con resistencias y valores del módulo

II. Espesor de la Subbase

III. Pérdida de soporte (LS)

IV. Profundidad a la fundación rígida

V. Espesor estimado de la losa

EJEMPLO: Cálculo para obtener el Módulo de reacción de la subrasante para pavimentos rígidos:

Datos

Tipo de Subbase	Granular
Espesor de la Subbase (plgs)	6
Pérdida de soporte (LS)	10
Profundidad a la fundación rígida (pies)	5
Espesor de losa proyectado (plgs)	9

Para cada combinación de datos que se efectúe cambiando los factores, es necesario hacer una tabla similar a la Tabla 4-1, separada para cada uno y poder determinar el módulo de reacción compuesto de la subrasante.

Tabla 4-1
Cálculo del daño relativo (Uf)

1	2	3	4	5	6
mes	**Módulo de subrasante Mr (PSI)**	**Módulo de subbase Esb (PSI)**	**Valor compuesto k (PCI)**	**Valor de k en fundación rígida (PCI)**	**Daño relativo Uf**
Enero	20,000	50,000	1,100	1,350	0.35
Febrero	20,000	50,000	1,100	1,350	0.35
Marzo	2,500	15,000	160	230	0.86
Abril	4,000	15,000	230	300	0.78
Mayo	4,000	15,000	230	300	0.78
Junio	7,000	20,000	400	540	0.78
Julio	7,000	20,000	400	540	0.60
Agosto	7,000	20,000	400	540	0.60
Septiembre	7,000	20,000	400	540	0.60
Octubre	7,000	20,000	400	540	0.60
Noviembre	4,000	15,000	230	300	0.78
Diciembre	20,000	50,000	1,100	1,350	0.35
				Total	7.25
Promedio = U / # meses considerados. = 7.25 / 12 = 0.60					
Módulo efectivo de reacción de la subrasante =				k (PCI)	= 540
Corrección por pérdida de soporte =				k (PCI)	= 170
				k (PCI)	= 46.1

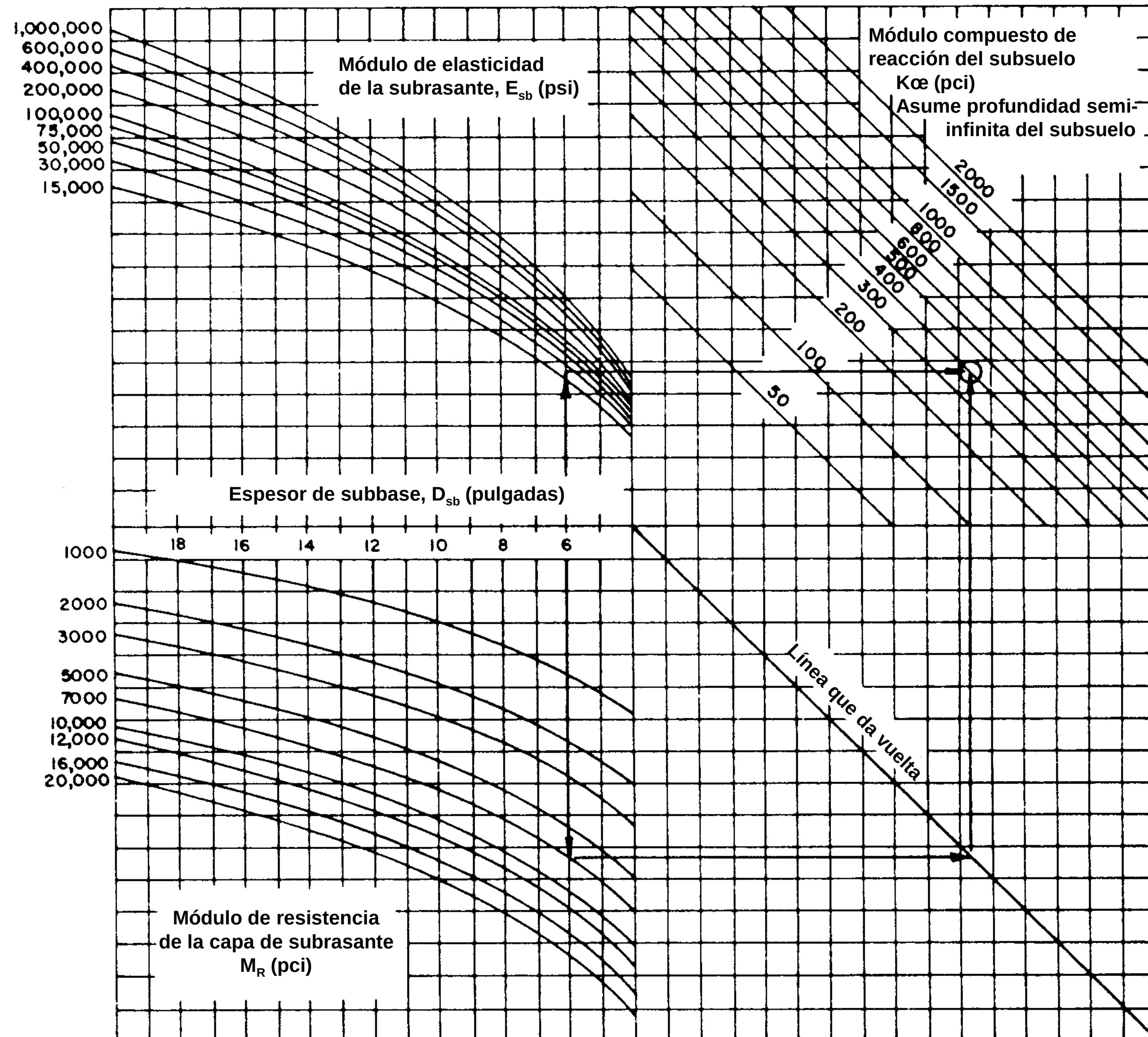
Fuente: datos obtenidos para el desarrollo del ejemplo.

- En la columna 2 se coloca el módulo de resiliencia de la subrasante para cada mes.

- En la columna 3 se colocan valores del módulo de resiliencia de la subbase, los cuales serán asumidos.

- Partiendo de los datos del ejemplo y de la tabla 4-1, y por medio del ábaco de la figura 4-3, para cada uno de los meses, se estima el valor de k, que es el efecto combinado de la subrasante y subbase; esto es, suponiendo que la capa rígida se encuentra a más de 3 metros de profundidad.

Figura 4-4
Módulo compuesto de reacción de la subrasante



Fuente: Guía para diseño de estructuras de pavimentos, AASHTO, 1,993

En el ejemplo, se usará el mes de junio, comenzando por el espesor de la subbase de 6´´, hacia arriba se encuentra el módulo de la subbase de 20,000; hacia abajo se encuentra la curva del módulo de resiliencia de la subrasante que es de 7,000; del punto de abajo se desplaza hacia la derecha hasta encontrar la línea que da vuelta y luego hacia arriba a converger con la otra línea de arriba y se encuentra el valor de 400, que es el Módulo compuesto de reacción de la subrasante; dato que se coloca en la columna 4.

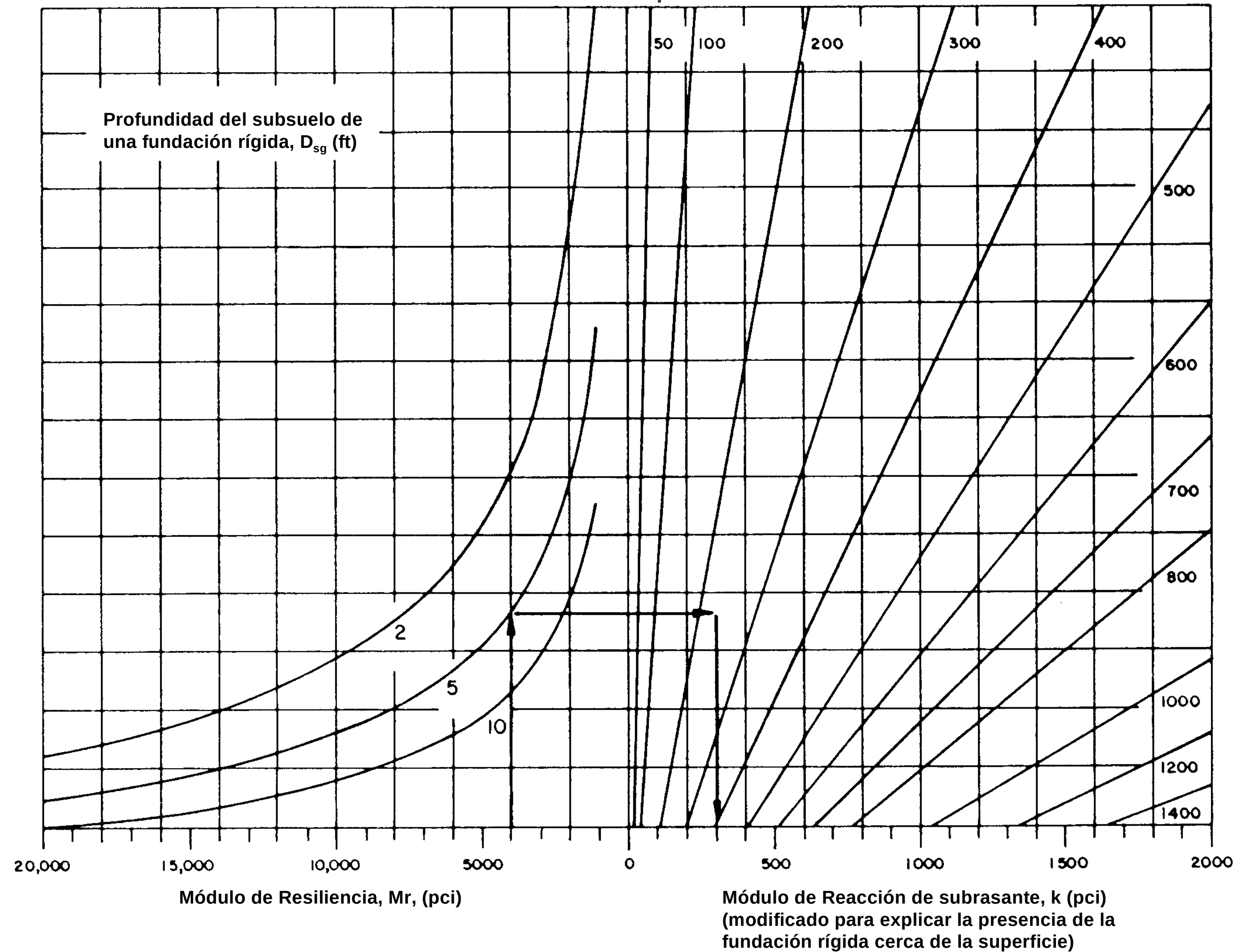
- En otro ejemplo se partirá de los datos del mes de abril de la tabla 4-1, en la cual el efecto de Mr de la fundación rígida cercana a la superficie es de 4000 PSI y está a menos de 1.5 metros de profundidad ó sea 5 pies, con estos datos y conforme el ábaco de la figura 4-5, se sale de la parte izquierda del mismo, en donde partiendo de 4000 PSI hacia arriba encontramos la curva de 5 pies y luego horizontalmente nos pasamos hacia la derecha hasta encontrar la curva del valor compuesto de k = 230 (PCI) y de allí hacia abajo encontramos el valor de k = 300 (PCI) que es el valor de reacción de la fundación rígida; valor que colocamos en la columna 5.

- Como otro ejemplo y con el valor estimado del espesor (9´´) de la losa y utilizando el valor de k = 540, del mes de Julio de la tabla 4-1, en el ábaco de la figura 4-6, partiendo de 540 hacia arriba encontramos la curva de 9 y hacia la izquierda encontramos el valor de 0.60 que es el daño relativo U en función de k para cada mes, dato que se coloca en la columna 6.

- Teniendo todos los valores de U_f en la tabla 4-1, éstos se suman y se dividen entre el número de meses incluidos en el cálculo para sacar el promedio; el valor efectivo de k es el que corresponde al valor medio del daño relativo (U_f) para el espesor de la losa proyectada.

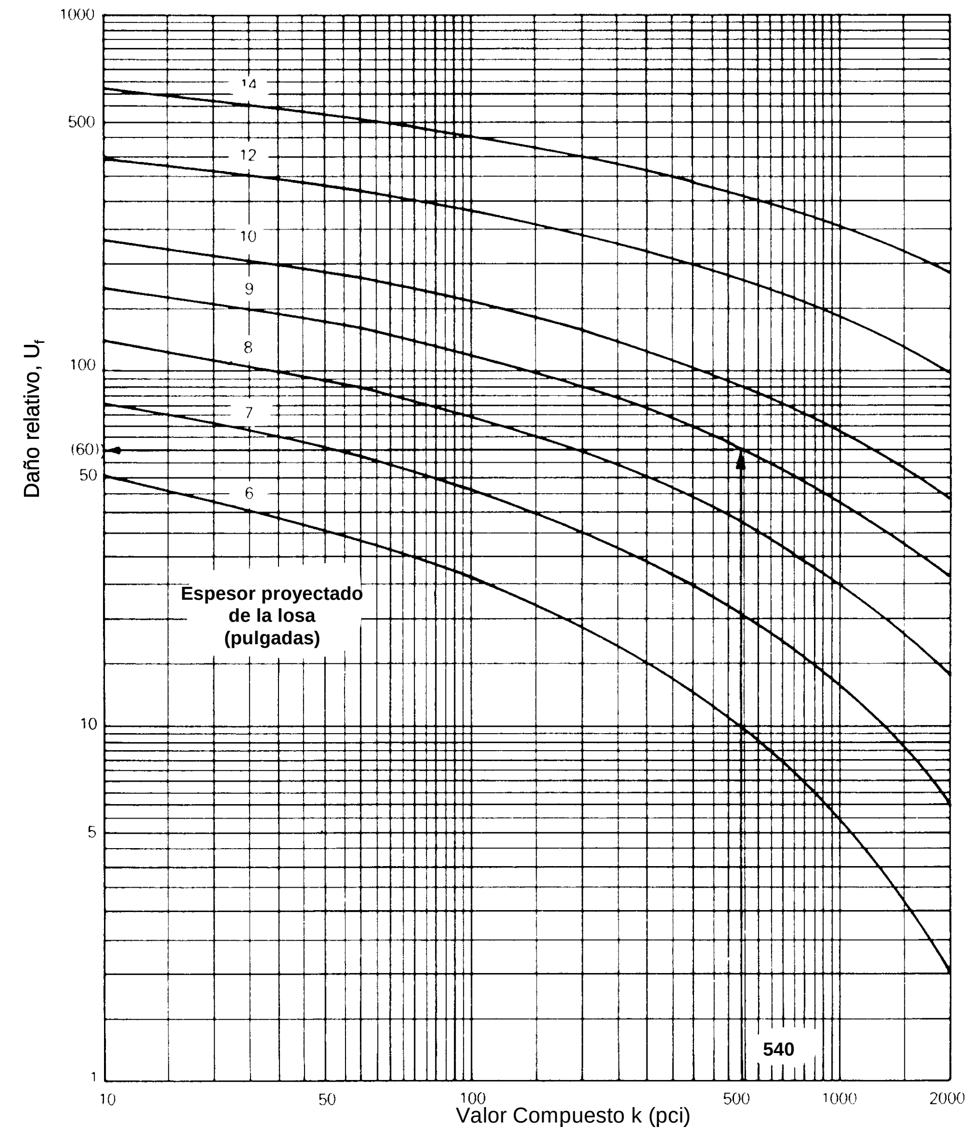
- Seguidamente se tiene que ajustar el valor efectivo de k, tomando en cuenta la pérdida de soporte de la subbase, LS, por erosión. Dicho ajuste se hace por medio del ábaco de la figura 4-7 y con este valor calculado se procede al diseño del pavimento rígido. Partiendo del valor del módulo efectivo de la reacción de la subrasante k = 540, hacia arriba encontramos la recta en la cual interceptamos con el valor asumido de la pérdida de soporte LS = 1.0 y seguidamente hacia la izquierda encontramos en valor efectivo del módulo de reacción de la subrasante K(PCI)=170 en función de la pérdida potencial de soporte de la subrasante.

Figura 4-5
Cálculos del Módulo de reacción de la subrasante, para considerar efectos de la fundación rígida cerca de la superficie



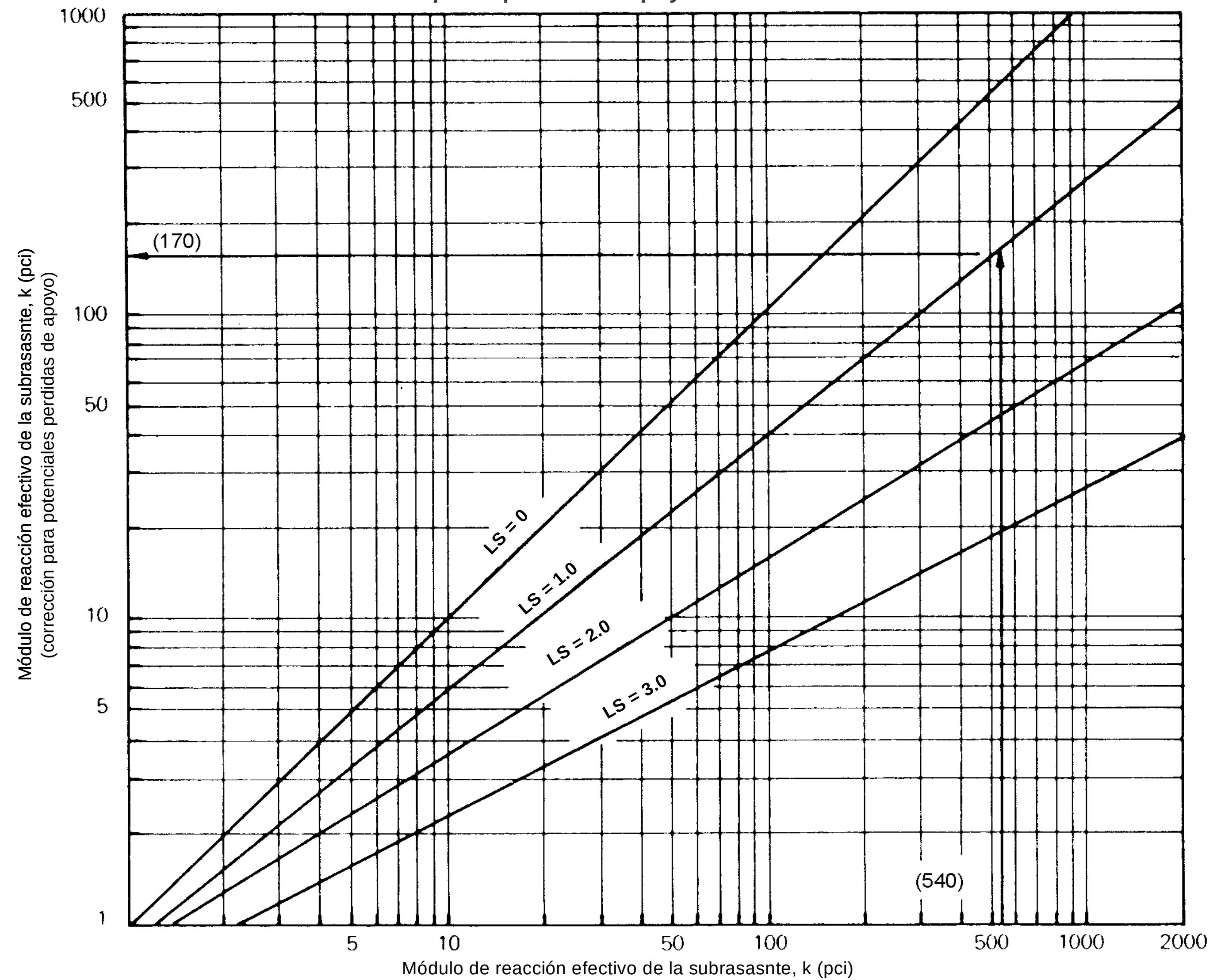
Fuente: Guía para el Diseño de estructuras de pavimentos, AASHTO, 1,993

Figura 4-6
Cálculo del Daño relativo (U_f) en pavimento rígidos, en función del espesor de losa y Módulo de reacción de la subrasante



Fuente: Guía para diseño de estructuras de pavimentos, AASHTO, 1,993

Figura 4-7
Corrección del Módulo efectivo de reacción de la subrasante por la pérdida de apoyo de subbase



Fuente: Guía para diseño de estructuras de pavimentos, AASHTO, 1,993

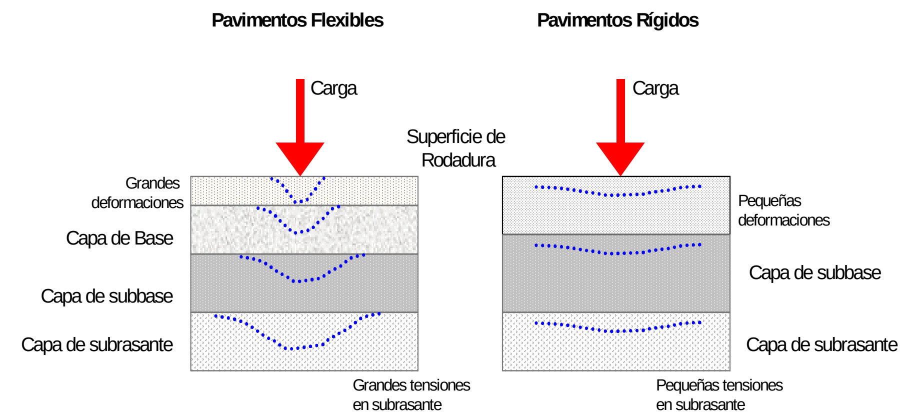
CAPÍTULO 5

ELEMENTOS DE LA ESTRUCTURA DE PAVIMENTO

5.1 Tipos de pavimento

Los pavimentos se dividen en flexibles y rígidos. El comportamiento de los mismos al aplicarles cargas es muy diferente, tal como puede verse en la figura 5.1.

Figura 5.1
Esquema del comportamiento de pavimentos flexibles y rígidos



En un pavimento rígido, debido a la consistencia de la superficie de rodadura, se produce una buena distribución de las cargas, dando como resultado tensiones muy bajas en la subrasante.

Lo contrario sucede en un pavimento flexible, la superficie de rodadura al tener menos rigidez, se deforma más y se producen mayores tensiones en la subrasante.

5.2 Elementos que integran el Pavimento Flexible

5.2.1 Subrasante

Es la capa de terreno de una carretera que soporta la estructura de pavimento y que se extiende hasta una profundidad que no afecte la carga de diseño que corresponde al tránsito previsto. Esta capa puede estar formada en corte o relleno y una vez compactada debe tener las secciones transversales y pendientes especificadas en los planos finales de diseño.

El espesor de pavimento dependerá en gran parte de la calidad de la subrasante, por lo que ésta debe cumplir con los requisitos de resistencia, incompresibilidad e inmunidad a la expansión y contracción por efectos de la humedad, por consiguiente, el diseño de un pavimento es esencialmente el ajuste de la carga de diseño por rueda a la capacidad de la subrasante.

a) Materiales

Tiene que estar libre de vegetación y materia orgánica, de lo contrario, el material deberá reemplazarse por material adecuado para subrasante en el tramo correspondiente o considerar la estabilización de los suelos subyacentes.

En general los materiales apropiados para capa de subrasante, son los suelos de preferencia granulares con porcentajes de hinchamiento según ensayos AASHTO T-193 y que no tengan características inferiores a los suelos que se encuentran en el tramo. Según AASHTO M-145, los suelos clasificados A-8, son materiales inadecuados para la capa de subrasante, ya que son suelos orgánicos constituidos por materiales vegetales o fangosos. Estos suelos generalmente tienen textura fibrosa, color café oscuro y olor a podredumbre y son altamente compresibles, con muy baja resistencia.

Cuando en la subrasante aparezcan áreas con este tipo de material, deberá reemplazarse por otro que llene los requisitos para subrasante, haciendo previamente la remoción del material inapropiado.

b) Compactación

Para compactar la capa de subrasante, el espesor de ésta debe escarificarse, homogenizarse, mezclarse, conformarse y compactarse en su totalidad, hasta lograr la densidad máxima según AASHTO T-180.

5.2.2 Subbase

Es la capa de la estructura de pavimento destinada fundamentalmente a soportar, transmitir y distribuir con uniformidad las cargas aplicadas a la superficie de rodadura de pavimento, de tal manera que la capa de subrasante la pueda soportar absorbiendo las variaciones inherentes a dicho suelo que puedan afectar a la subbase. La subbase debe controlar los cambios de volumen y elasticidad que serían dañinos para el pavimento.

Se utiliza además como capa de drenaje y contralor de ascensión capilar de agua, protegiendo así a la estructura de pavimento, por lo que generalmente se usan materiales granulares. Al haber capilaridad en época de heladas, se produce un hinchamiento del agua, causado por el congelamiento, lo que produce fallas en el pavimento, si éste no dispone de una subrasante o subbase adecuada.

Esta capa de material se coloca entre la subrasante y la capa de base, sirviendo como material de transición, en los pavimentos flexibles.

a) Materiales

El material de subbase deberá ser seleccionado y tener mayor valor soporte (CBR) que el material de subrasante y su espesor será variable por tramos, dependiendo de las condiciones y características de los suelos existentes en la subrasante.

Los materiales de subbase deben ser suelos del tipo granular que llenen los siguientes requisitos:

a.1 El valor soporte (CBR) debe determinarse según AASHTO T-193 sobre muestra saturada según AASHTO T-180.

a.2 El tamaño de las piedras que contenga el material de subbase no debe ser mayor de 2/3 del espesor de esta y los porcentajes que pasan los tamices No. 40 y No. 200, deben ser según AASHTO T-11 y T-27.

a.3 El índice de plasticidad debe determinarse según AASHTO T-90, y el límite Líquido según AASHTO T-89, determinados ambos sobre una muestra preparada en húmedo, según AASHTO T-146.

a.4 El equivalente de arena es determinado por el método AASHTO T-176.

a.5 El material debe estar libre de impurezas tales como: basura, materia orgánica, terrones de arcilla y cualquier otro material que pueda ocasionar problemas específicos al pavimento.

b) Compactación

El material de subbase debe ser tendido en capas no mayores de 20 centímetros de espesor. Este debe homogenizarse y conformarse, agregándole la cantidad de agua que sea necesaria para lograr la compactación en su totalidad, hasta alcanzar su densidad máxima por el método AASHTO T-180.

5.2.3 Base

Es la capa de pavimento que tiene como función primordial, distribuir y transmitir las cargas ocasionadas por el tránsito, a la subbase y a través de ésta a la subrasante, y es la capa sobre la cual se coloca la capa de rodadura. Las bases especificadas son las siguientes:

5.2.3.1 Base granular

Material constituido por piedra de buena calidad, triturada y mezclada con material de relleno o bien por una combinación de piedra o grava, con arena y suelo, en su estado natural. Todos estos materiales deben ser clasificados para formar una base integrante de la estructura de pavimento. Su estabilidad dependerá de la graduación

de las partículas, su forma, densidad relativa, fricción interna y cohesión, y todas estas propiedades dependerán de la proporción de finos con respecto al agregado grueso.

a) Materiales

Debe corresponder a los tipos de graduación determinados según AASHTO T-27 y T-11.

Además, el material de base es necesario que llene como mínimo las siguientes condiciones:

a.1 Valor soporte (CBR) para piedra triturada y para grava (canto rodado), según AASHTO T-193, la compactación según AASHTO T-180 e hinchamiento máximo según AASHTO T 193.

a.2 El material debe estar libre de impurezas y residuos orgánicos.

a.3 La porción de agregado retenida en el tamiz No. 4 no debe tener un porcentaje de desgaste, por abrasión, según AASHTO T-96.

a.4 La porción que pasa el tamiz No. 40 debe tener un índice de plasticidad según se indica en AASHTO T-90 y un límite liquido mayor al indicado en AASHTO T-89, determinados ambos sobre una muestra preparada en húmedo según AASHTO T-25.

a.5 El porcentaje que pasa el tamiz No. 200, debe ser menor que la mitad del porcentaje que pasa el tamiz No. 40.

a.6 El equivalente de arena no debe de ser menor a como se indica en AASHTO T-176.

a.7 Cuando se necesite agregar material de relleno en adición al que se encuentra naturalmente en el material triturado, para proporcionarle características adecuadas de granulometría y cohesión, éste debe ser libre de impurezas y consistir en suelo arenoso, limo orgánico, polvo de roca u otro material con alto porcentaje de partículas que pasen por el tamiz No. 10.

b) Compactación

Antes de tender el material de base, el material de subbase debe tener la compactación especificada.

Cuando el espesor de base sea mayor de 20 centímetros, se tendrá que hacer la compactación por capas, siempre que éstas no sean mayores de 20 ni menores de 10 centímetros. Además, se tiene que humedecer la superficie entre capas, para conseguir una mejor adhesión entre éstas y así evitar deslizamientos.

Al compactar, el material debe ser homogéneo y debe estar humedecido y mezclado, para lograr la densidad especificada. La capa de base ya terminada, tiene que quedar lo más uniforme posible, para evitar concentración de esfuerzos en la capa de rodadura, al estar el pavimento ya dispuesto para la circulación de vehículos.

5.2.3.2 Base estabilizada

Es la capa formada por la combinación de piedra o grava trituradas, combinadas con material de relleno, mezclados con materiales o productos estabilizadores, preparada y construida aplicando técnicas de estabilización, para mejorar sus condiciones de estabilidad y resistencia, para constituir una base integrante del pavimento destinada fundamentalmente a distribuir y transmitir las cargas originadas por el tránsito, a la capa de subbase.

PRODUCTOS ESTABILIZADORES

i. Cemento Portland

Es el producto de la mezcla de diferentes materiales que se someten a un proceso de cocción y molido, para constituir un material ligante al combinarse con agua y suelo.

Cuando las bases han sido compactadas a su humedad óptima y densidad máxima, son altamente resistentes a la desintegración, además de mejorar sus condiciones de estabilidad y resistencia a la humedad, proporcionando una mejor distribución de las cargas de

tránsito a las capas subyacentes de la estructura de pavimento. **La adición de cemento a ciertos suelos plásticos los transforma en buenos materiales para base.**

La utilización de cemento Portland para la estabilización de materiales de base, se considera cuando es necesario cambiar algunas características físicas y mejorar sus condiciones mecánicas. Es conveniente que al utilizar cemento para estabilizar suelos, se realicen pruebas en el laboratorio, que permitan determinar el contenido máximo que se puede utilizar, sin que se produzcan agrietamientos en la muestras, ya que este comportamiento es el que se obtendría en la carretera.

Es necesario tomar en cuenta, que no es lo mismo estabilizar que rigidizar, ya que los materiales obtienen del producto estabilizador algunas condiciones de beneficio como son la impermeabilidad, disminución de los límites de consistencia y aumento del CBR, pero también toman otras como una alta rigidización que no es conveniente al material, por el hecho de que esta condición permite el aparecimiento de grietas.

Es conveniente hacer notar que el cemento como estabilizador es un material de alta calidad, especialmente si los materiales con los cuales se va a combinar son de la misma generación que él (gravas, rocas, arenas, etc.), pero al utilizarse con suelos como limos, arcillas, etc. La situación cambia, ya que estos son muy susceptibles a agrietarse cuando el contenido de cemento es muy alto.

a) Materiales

El material de base debe ajustarse a los requisitos contenidos en el numeral 5.2.3,1 literal a).

b) Requisitos del cemento Portland

El cemento Portland a utilizar deberá ajustarse a la norma AASHTO M 85-63. La cantidad aproximada de cemento debe estar comprendida dentro de un 3% mínimo a un 8% máximo de cemento en peso, respecto al peso del material a estabilizar.

c) Compactación

La capa estabilizada debe compactarse en su totalidad hasta lograr su densidad máxima, según AASHTO T-134 y T-191 y debe ejecutarse en capas no mayores de 30 ni menores de 15 centímetros. Cuando la capa estabilizada es muy alta, la compactación debe hacerse por capas de 15 centímetros y no debe tenderse la siguiente capa antes de transcurrido el tiempo mínimo de curado de la inmediata inferior.

No deben transcurrir más de 60 minutos entre el final del tendido y la conformación y el inicio de la compactación.

Realizada la compactación, se debe comprobar la resistencia a la compresión según ASTM[1] D–1632 y D-1633.

La textura de la superficie no debe ser lisa, debiéndose escarificar ligeramente o pasar escoba de arrastre para dejar la superficie con rugosidad adecuada, con el fin de evitar deslizamientos entre la capa de rodadura y sobre el material de base estabilizado.

d) Curado

La superficie debe protegerse, aplicándole un material de curado que sea adecuado para este tipo de trabajo. Lo que normalmente se hace, es aplicar un riego de imprimación con material bituminoso líquido, con el fin de formar una capa impermeable y así evitar que el agua necesaria para el fraguado del cemento, se evapore.

Para lograr la resistencia requerida, el curado debe realizarse en forma eficiente, de lo contrario la resistencia puede disminuir hasta un 40%.

ii. Cal

Es el producto de la cocción de la piedra caliza, para constituir un material ligante al combinarse con agua y suelo.

[1] No tiene equivalencia en AASHTO

Cuando ha sido compactada a su humedad óptima y densidad máxima, constituye una base integrante de un pavimento, destinada fundamentalmente a distribuir y transmitir las cargas originadas por el tránsito, a la capa de subbase.

La utilización de cal para la estabilización de bases, se considera cuando es necesario cambiar algunas características físicas y mejorar las condiciones mecánicas del material. Es conveniente que al utilizar cal para estabilizar suelos, se realicen pruebas en el laboratorio, que permitan determinar el contenido máximo que se puede utilizar, sin que se produzcan agrietamientos en las muestras, ya que este comportamiento es el que se obtendría en la carretera.

Es necesario tomar en cuenta, que el utilizar cal para estabilizar, los materiales obtienen del material estabilizador algunas condiciones de beneficio como son la impermeabilidad, disminución de los limites de consistencia y aumento del CBR; en el caso de la cal es difícil llegar a tener un material rígido, porque la reacción química es bastante más lenta que con cemento para lograr una resistencia especificada.

Es conveniente hacer notar que la cal como estabilizador es un material de calidad, ya que por ser un producto derivado de piedra caliza, tiene la capacidad de combinarse con cualquier otro material sin producir reacciones químicas que involucren un fraguado rápido, ni una rigidización que derive en el aparecimiento prematuro de grietas por contracción.

a) Materiales

El material de base debe ajustarse a los requisitos contenidos en el numeral 5.2.3,1 literal a).

b) Requisitos de la cal

La cal hidratada debe cumplir con lo establecido en AASHTO M-216. Las cantidades de cal pueden variar entre 2% y 6% en peso, del material a estabilizar.

Como los materiales a estabilizar con cal pueden ser de cualquier clase de suelo, lo recomendable es hacer pruebas de laboratorio, para determinar la cantidad adecuada en porcentaje con respecto al peso que es necesario aplicar, efectuando pruebas de compresión no confinada y observando el comportamiento de las muestras al dejarlas secar al aire.

El material debe ser regado con agua en cantidad adecuada para su homogenización. La Lechada de cal, puede hacerse con cal hidratada o cal viva pulverizada, cumpliendo los siguientes requisitos:

a.1) El contenido de sólidos debe ser un mínimo del 87% en masa, de óxidos de calcio y magnesio.

a.2) El porcentaje retenido del residuo en masa debe cumplir con lo indicado en la tabla 5-1 según el tamaño de los tamices.

Tabla 5-1
Requisitos de graduación para el residuo

Tamaño del tamiz		% máximo retenido en masa
3.350 mm	No. 6	0.2
0.600 mm	No. 30	4.0

Fuente: Especificaciones Generales para la construcción de carreteras y Puentes, Dirección General de Caminos, Guatemala, año 2,000.

a.3) El grado de la lechada debe corresponder como sigue:
- Lechada grado 1: contenido de sólidos no debe ser mayor de 31% de la masa total de la lechada.
- Lechada grado 2: contenido de sólidos no debe ser mayor de 35% de la masa total de la lechada.

iii. Materiales Bituminosos

Asfalto es el último producto resultante de la destilación del petróleo.

La combinación de suelos con asfalto mejora las condiciones de estabilidad y resistencia a la humedad, proporcionando mejor distribución de las cargas ocasionadas por el tránsito a las capas subyacentes de la estructura de pavimento.

a) Materiales

El material de base debe ajustarse a los requisitos contenidos en el numeral 5.2.3,1 literal a).

b) Requisitos del material bituminoso

El material bituminoso debe ser cemento asfáltico de alta penetración, asfaltos rebajados, emulsiones asfálticas y alquitranes.

La cantidad de emulsión asfáltica puede variar entre 4% y 8% y al utilizar asfaltos rebajados, entre 3.5% a 7.5% con respecto al peso seco del material a estabilizar.

c) Compactación

La mezcla debe ser uniformemente compactada, hasta lograr la densidad máxima. En caso que el espesor de la base estabilizada con material bituminoso fuera mayor de 15 centímetros, la mezcla debe ser tendida y compactada en dos ò más capas.

iv. Otros productos estabilizadores

Podrán usarse compuestos estabilizadores químicos y orgánicos basados en resinas sintéticas, solos o en combinación con cal, cemento o material bituminoso. Estos productos deben requerir el certificado de calidad extendido por el fabricante o distribuidor, incluyendo los aspectos referentes a dosificación, procedimientos de aplicación, resistencia y durabilidad del producto. Se deberán realizar ensayos de laboratorio a las mezclas de estos productos con suelos, para determinar sus características fisico-quimicas y comprobar su efectividad.

a) Compactación

Para estas bases estabilizadas se debe obtener la resistencia a la compresión según AASHTO T-135 y la densidad máxima Proctor, según AASHTO T-99.

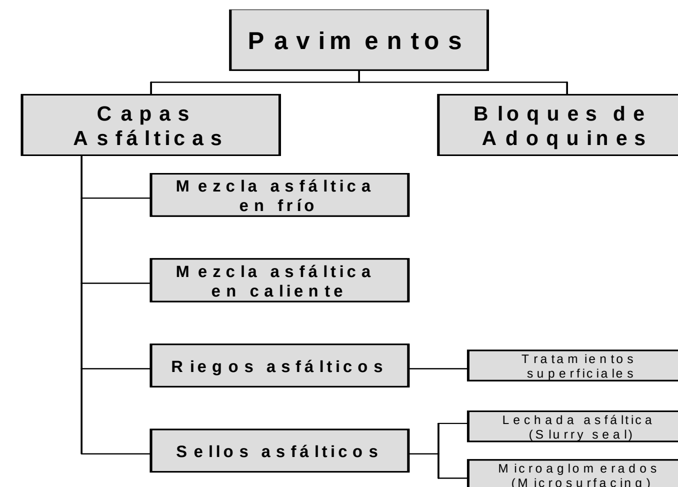
5.2.4 Superficie de rodadura

Es la capa que se coloca sobre la base. Su objetivo principal es proteger la estructura de pavimento, impermeabilizando la superficie, para evitar filtraciones de agua de lluvia que podrían saturar las capas inferiores. Evita la desintegración de las capas subyacentes a causa del tránsito de vehículos.

Asimismo, la superficie de rodadura contribuye a aumentar la capacidad soporte del pavimento, absorbiendo cargas, si su espesor es apreciable (mayor de 4 centímetros), excepto el caso de riegos superficiales, ya que para estos se considera nula.

Las superficies de rodadura de los pavimentos flexibles se dividen, según se muestra en la figura 5-2:

Figura 5-2
Tipos de superficies de rodadura en pavimentos flexibles



CAPAS ASFÁLTICAS:

5.2.4.1 Mezcla asfáltica en frío

Es la mezcla de agregados pétreos con aglomerantes bituminosos emulsificados o asfaltos rebajados, materiales que deben cumplir con los requisitos aquí especificados, los cuales son mezclados mediante procedimientos controlados y darán como resultado un material con propiedades y características definidas.

a) Materiales

a.1) Material bituminoso

El material bituminoso para la fabricación de la mezcla, será una Emulsión asfáltica ó asfalto rebajado seleccionada de acuerdo al tipo de agregados que se pretenda utilizar, cumpliendo con AASHTO M-140 y M-208.

a.2) Agregados pétreos

Los agregados pétreos serán rocas o gravas trituradas siendo materiales limpios, densos y durables, libre de polvo, terrones de arcilla u otras materias indeseables, que puedan impedir la adhesión completa del asfalto a los agregados pétreos.

Los materiales deben cumplir con el ensayo de abrasión según AASHTO T-96; equivalente de arena según AASHTO T-176; límite plástico según AASHTO T-90; límite líquido según AASHTO T-89 y desintegración al sulfato de sodio según AASHTO T-104.

5.2.4.2 Mezcla asfáltica en caliente

Es la mezcla de agregados pétreos con aglomerantes bituminosos, materiales que deben cumplir con los requisitos aquí especificados, los cuales mezclados mediante procedimientos controlados en caliente, darán como resultado un material con propiedades y características definidas.

a) Materiales

a.1) Material bituminoso

El material asfáltico, tipo, grado, y especificación del cemento asfáltico o del cemento asfáltico modificado con polímeros a usar, debe ser uno de los establecidos en la tabla 5-2.

Para el caso de asfaltos con clasificación PG (Performance Grade ò grado de comportamiento), el grado será de acuerdo con el rango comprendido entre el promedio de las temperaturas máximas durante los siete días más calurosos del año y la temperatura mínima donde se localice el proyecto incrementando el valor de temperatura alta un grado de conformidad con el manual del Instituto de Asfalto para tránsito lento y un grado adicional si el tránsito esperado excede ESAL`s de 30 x 10^6 en el carril de diseño, pudiéndose fijar grados intermedios para los rangos de temperatura indicados en la tabla 5-2 o grados mayores que los indicados cuando así se requiera.

Tabla 5-2
Especificaciones del cemento Asfáltico

Tipo y grado de cemento asfáltico	Especificación
Graduación por viscosidad: • AC-10 • AC-20 • AC-40	AASHTO M 226
Graduación por penetración: • 40 – 50 • 60 – 70 • 85 – 100 • 120 – 150	AASHTO M 20
Graduación PG: • 22 – 64 • 22 – 70 • 22 – 76 • 22 – 82	AASHTO MP 1

Fuente: Especificaciones Generales para la Construcción de Carreteras y Puentes, Dirección General de Caminos, Guatemala, 2,000

El rango de las temperaturas del cemento asfáltico para la preparación de la mezcla de los especimenes en el laboratorio, será el correspondiente para producir una viscosidad cinemática entre 0.15 y 0.19 Pascales-segundo (Pa-s) (150 y 190 centiStokes cS).

Para el diseño de mezcla asfáltica por el procedimiento de Superpave, sólo se podrán usar los asfaltos con clasificación PG.

a.2) Agregados pétreos

Para los requerimientos de la Mezcla Asfáltica, se adoptará el método Marshall según AASHTO T-245, que sirve para verificar las condiciones de vacíos y estabilidad que deben satisfacer los valores indicados en el Manual Centroamericano de Especificaciones para la Construcción de Carreteras y Puentes Regionales, SIECA, 2,001.

La porción de agregados minerales gruesos retenida en la malla No. 8 se denominará agregado grueso y se compondrá de piedras o gravas trituradas. Sólo se podrá utilizar un tipo único de agregado grueso.

La piedra o grava triturada debe ser limpia, compacta y durable, carente de suciedad u otras materias inconvenientes y debe tener un desgaste no mayor de 40% a 500 revoluciones al ensayarse por el método de AASHTO T-96.

Al ser sometidas a ensayos alternativos de resistencia mediante sulfato de sodio empleando el método de AASHTO T-104, no podrá tener una pérdida en peso mayor de 12%.

Cuando se utilice grava triturada, no menos de 50% en peso de las partículas retenidas en la tamiz No. 4, debe tener dos caras fracturada como mínimo.

El agregado grueso no debe contener más de 8% en peso, de partículas planas o alargadas, considerándose partículas alargadas aquellas cuya relación de largo entre ancho es mayor que 5.0 y plana cuando la relación de ancho entre espesor es mayor que 5.0, según AASHTO T-11 y T-27.

La porción de agregados minerales que pasa la malla No. 8 se denominará agregado fino y podrá estar compuesto por arena natural, tamizados de piedra o de una combinación de ambos. Los agregados finos deben tener granos limpios, compactos, angulares y de superficie rugosa, carentes de terrones de arcilla u otras sustancias inconvenientes.

El material de relleno de origen mineral (filler) que sea necesario emplear, se compondrá de polvo calcáreo, roca dolomítica, cemento Portland u otros elementos no plásticos.

Estos materiales deben carecer de materias extrañas y objetables, serán secos y libres de terrones, y cuando sean ensayados en el laboratorio deben cumplir las siguientes exigencias granulométricas

Tabla 5-3
Granulometría del relleno mineral

Tamiz		% que pasa
0.60 mm	No. 30	100
38.1 mm	No. 100	95 – 100
25.0 mm	No. 200	65 - 100

Fuente: Especificaciones Generales para la Construcción de Carreteras y Puentes, Dirección General de Caminos, Guatemala, 2,000.

5.2.4.3 Riegos asfálticos

Son riegos sucesivos y alternados de material bituminoso y agregados pétreos triturados, que son compactados para lograr una acomodación más densa.

Brinda a la superficie las condiciones necesarias de impermeabilidad, resistencia al desgaste y suavidad para el rodaje. Se pueden mencionar: Tratamientos superficiales simples, dobles y triples.

i. Tratamientos superficiales:

Consiste en la aplicación de material asfáltico sobre la superficie preparada de base, el riego y compactación del material pétreo graduado, que sirve de cubierta y se colocará sobre el material asfáltico en diferentes capas alternándolas.

a) Materiales

a.1) Material bituminoso

El material asfáltico usado será cemento asfáltico de penetración 120 – 150 según AASHTO M - 20; cemento asfáltico de graduación por viscosidad AC-20 según AASHTO M – 26 o emulsiones asfálticas RS-1, RS-2; CRS-1 y CRS-2, según AASHTO M-140.

Deben aplicarse a razón de 0.20 a 0.40 galones (US) de asfalto residual por metro cuadrado, a una temperatura entre 140 °C y 177 °C para el Cemento asfáltico 85-100 ò el AC-20 por viscosidad; y una temperatura de 75 °C a 130 °C para RS–1 y CRS–1, una temperatura de 110 °C a 160 °C para RS-2 y CRS-2 y rebajados.

a.2) Agregados pétreos

El material de cubierta debe cumplir con las especificaciones indicadas en la tabla 5-4:

Tabla 5-4
Especificaciones de referencia

Análisis Mecánico	AASHTO T-27
Ensayo de Desgaste de Los Ángeles	AASHTO T-96
Desintegración al sulfato[2] (5 ciclos) de sodio	AASHTO T-104
Afinidad de asfalto	AASHTO T-182

Fuente: Generada por el Consultor

El material de cubierta debe aplicarse a razón de 9.0 a 20.0 kg/m^2 y debe cumplir con los requisitos de graduación, según AASHTO M – 43.

El agregado a utilizar debe tener un porcentaje de desgaste no mayor de 35% y no debe tener una desintegración máxima al sulfato de sodio de 12%. La cantidad de trituración se debe regular de manera que el 60% en peso de todo el material mayor que el tamiz No. 4 tenga un mínimo de dos caras mecánicamente fracturadas.

[2] También conocido como Ensayo de sanidad o de bondad

Por lo menos el 95% del asfalto debe retenerse cuando el material de cubierta esté sujeto al Ensayo de Afinidad al Asfalto, AASHTO T-182. El agregado que se contamine debe sustituirse antes de su uso.

NOTA:

Se recomienda la colocación de riegos asfálticos sobre bases estabilizadas con cemento Portland, para minimizar que las grietas por dilatación o contracción se reflejen en la superficie; o en su caso, posterior a la estabilización, la colocación del tratamiento superficial debe efectuarse como mínimo 3 meses después, para dar lugar a que las grietas en la base se manifiesten, entre otras.

5.2.4.4 Sellos asfálticos

Es el revestimiento con emulsiones asfálticas y agregado fino, destinado principalmente a impermeabilizar una superficie asfáltica existente, por medio del llenado de los vacíos y grietas y/o evitar la desintegración de superficies asfálticas desgastadas y mejorar su resistencia contra el deslizamiento aumentando la durabilidad del pavimento. Se pueden mencionar dos tipos de sellos asfálticos: La lechada asfáltica (slurry seal) y los microaglomerados (microsurfacing).

i. Lechada Asfáltica (Slurry Seal):

Consiste en una mezcla de agregados pétreos, emulsión asfáltica, agua y aditivos, que proporcionan una mezcla homogénea, que se aplica, sobre un pavimento, como un tratamiento de sellado con el fin de impermeabilizarlo; proporcionando una textura resistente, antideslizante y adherida firmemente a la superficie.

a) Materiales

Los agregados pétreos deben ser naturales o producidos por trituración, tales como: granito, basalto, escoria o algún otro material de alta calidad o combinación de estos. Se recomienda siempre la combinación de arenas naturales y arenas producto de trituración, para tener una estructura estable.

Las arenas de río tendrán una absorción máxima de 1.25% y su porcentaje en la composición de la mezcla puede variar de 30 a 60%, la arena debe someterse a ensayos y debe cumplir con las siguientes normas:

Tabla 5-5
Métodos de prueba

Prueba	Método
Equivalente de Arena	AASHTO T-176
Desintegración al sulfato de sodio	AASHTO T-104
Granulometría	AASHTO T-27 y T-11
Modulo de finura	AASHTO T-27
Desgaste de Los Ángeles	AASHTO T-96

Fuente: Generada por el Consultor

Debe considerarse que el material alargado no sea más del 35%; los materiales pétreos a utilizar para la ejecución de esta actividad deben tener un peso específico superior a los 1,450 kg/m3.

El Filler o llenante mineral a utilizar debe ser cemento tipo Portland, cal hidratada procesada industrialmente, cenizas volantes o algún otro filler según AASHTO M-19.   La cantidad del llenante mineral que se emplee debe tomarse como parte de la granulometría y la misma será la parte faltante que pase por tamiz No. 200. No se permitirá el empleo de limos como llenante mineral.

El agua a utilizar debe ser potable y debe garantizarse su compatibilidad con el resto de los materiales

La emulsión asfáltica a utilizar, en cuanto a tipo, grado, especificación y temperatura de aplicación, será conforme a la tabla 5-6.

Tabla 5-6
Requisitos para las Emulsiones Asfálticas

Tipo y grado de emulsión asfáltica	Especificación	Temperatura de aplicación en ° C
Lechada Asfáltica (Slurry Seal)		
Aniónicas: SS-1, SS-1h	AASHTO M 140	20-70
Catiónicas: CSS-1, CSS-1h	AASHTO M 208	50-85

Fuente: Especificaciones Especiales para la Construcción de Carreteras y Puentes, dirección General de Caminos, Guatemala, 2,000

Se debe utilizar cemento asfáltico emulsificado, de los mencionados a continuación:

- Emulsión asfáltica de rompimiento rápido controlado con 3 minutos como mínimo de mezclado.

- Emulsión asfáltica de rompimiento medio controlado con un tiempo de mezclado de más de 3 minutos y un rompimiento entre 10 a 30 minutos.
- Emulsión asfáltica del tipo lento (super estable). El rompimiento de la emulsión puede ocurrir entre los 30 minutos a dos horas de acuerdo a la temperatura ambiente.

- La emulsión utilizada debe cumplir con AASHTO M - 140.

ii. Microaglomerados (Microsurfacing):

El Microsurfacing, también conocido como sistema MS-1, consiste en una mezcla de emulsión catiónica de asfalto modificado con polímeros, agregados minerales, rellenadores, agua y otros aditivos que son tendidos sobre una superficie pavimentada, evitando la desintegración de superficies asfálticas desgastadas y mejorando su resistencia contra el deslizamiento, aumentando su durabilidad.

a) Materiales

La emulsión asfáltica debe modificarse con un polímero que se incorporará al cemento asfáltico antes de emulsificarlo. El residuo asfáltico de una emulsión modificada, debe tener al menos 3% de polímero calculado en peso.

La tabla 5-7 da las especificaciones para la emulsión asfáltica catiónica modificada dados por AASHTO:

Tabla 5-7
Normas para emulsión asfáltica catiónica modificada con polímeros

Descripción	AASHTO
Viscosidad Saybolt Furol a 25ºC	T-59
Estabilidad en almacenaje1 día en % sedimentado	1%
Carga de la Partícula DOTD TR 311	Positiva, mínima
% de emulsión retenido en malla No. 20	0.1% máxima
Residuo Asfáltico obtenido por destilación	T-59
Penetración a 25ºC, 100 gr., 5 segundos	T-49
Ductibilidad a 25ºC, 5cm/min, en cm.	T-51
Solubilidad en tricloro estileno,	T-44

Fuente: Manual Centroamericano de Mantenimiento de Carreteras, SIECA, 2,001

La emulsión de asfalto modificada debe ser formulada para que la mezcla de pavimento MS-1 pueda ser aplicada con humedad relativa no mayor del 50% y una temperatura ambiental de no menos de 24ºC, y fraguar lo suficiente para que al abrir el tránsito en una hora la carpeta no sufra daños, según se muestra en las tablas 5-8, 5-9, 5-10 y 5-11.

Tabla 5-8
Requisitos para la Emulsión asfáltica modificada

Tipo y grado de emulsión asfáltica	Especificación
Microsurfacing -Catiónicas • CSS-1h	AASHTO M 208

Fuente: Generadas por el Consultor

Tabla 5-9
Polímeros típicos utilizados para modificar asfaltos

Tipo	Presentación	Composición Química
1. Elastómeros:		
• Copolímero de Bloque	Látex	Estireno-Butadieno (SB)
• Copolímeros aleatorios	Látex	Estireno-Butadieno-Hule (SBR)
• Copolímero de Bloque	Granulado o en polvo	Estireno-Butadieno-Estireno (SBS)
• Copolímero de Bloque	Grumos	Estireno-Butadieno (SB)
• Copolímero de Bloque	Granulado o en polvo	Estireno-Butadieno-Estireno (SBS)
• Homopolímero	Látex	Policloropreno
• Copolímeros aleatorios	Látex	Estireno-Butadieno-Hule (SBR)
• Copolímero de Bloque	Pre-mezclado	Estireno-Butadieno (SB)
• Copolímero aleatorio	Látex	Estireno-Butadieno-Hule (SBR)
• Copolímero de Bloque	Granulado o en polvo	Estireno-Butadieno-Estireno (SBS)
2. Plastómeros:		
• Copolímero	Granulado o en polvo	Etileno Vinilo Acetato (EVA)
• Homopolímero	Premezclado con el CA	Polietileno de Baja Densidad (LDPE)
• Copolímero	Granulado o en polvo	Etileno Vinilo Acetato (EVA)
• Copolímero	Granulado o en polvo	Etileno Metilacrilato (EMA)
• Copolímero	Pelotitas (Pellets)	Etileno Vinilo Acetato (EVA)

Fuente: Especificaciones Especiales para la Construcción de Carreteras y Puentes, Dirección General de Caminos, Guatemala, 2,000

Tabla 5-10
Especificaciones de los Asfaltos Modificados Tipo I

Propiedades	Norma		Clases de Asfalto Modificado Tipo I			
			I-A	I-B	I-C	I-D
Penetración, a 25° C, 100g y 5 s	AASHTO T 49	Min. Máx.	100 150	75 100	50 75	40 75
Penetración, a 4° C, 200g y 60 s	AASHTO T 49	Min.	40	30	25	25
Viscosidad, 60° C, Poises	AASHTO T 202	Min.	1000	2500	5000	5000
Viscosidad, 135° C, centi Stokes	AASHTO T 201	Máx.	2000	2000	2000	2000
Punto de ablandamiento, R & B, ° C	AASHTO T 53	Min.	43.3	48.9	54.4	60
Punto de Flama, ° C	AASHTO T 48	Min.	218.3	218.3	232.2	232.2
Solubilidad en Tricloro etileno (TCE), % (1)	ASTM D 2042	Min.	99	99	99	99
Separación (2), diferencia R & B, ° C	AASHTO T 44	Máx.	2.2	2.2	2.2	2.2
Ensayo del Residuo del Horno de Película Delgada (RTFOT)						
Recuperación elástica (3), a 25° C, %	AASHTOT179	Min.	45	45	45	50
Penetración a 4° C, 200g y 60s	AASHTO T 49	Min.	20	15	13	13

(1) Solubilidad del asfalto original.

(2) Diferencias de puntos de ablandamiento de la parte superior e inferior de una muestra de asfalto modificado con polímeros, a 162.8° C durante 48 horas según se describe en el Apéndice A de las especificaciones guía para asfaltos modificados con polímeros, elaboradas por la AASHTO-AGC-ARTBA.

(3) Deformación recuperable después del ensayo de ductilidad, AASHTO T 51 descrito en el Apéndice B de las especificaciones guías para asfaltos modificados con polímeros, elaboradas por la AASHTO-AGC-ARTBA.

Fuente: Especificaciones Especiales para la Construcción de Carreteras y Puentes, Dirección General de Caminos, Guatemala, 2,000

Tabla 5-11
Especificaciones de los Asfaltos Modificados Tipo II

Propiedades	Norma		Clases de Asfalto Modificado Tipo II		
			II-A	II-B	II-C
Penetración, a 25° C, 100g y 5 s	AASHTO T 49	Min.	100	70	80
Viscosidad, 60° C, Poises	AASHTO T 202	Min.	800	1600	1600
Viscosidad, 135° C, centi Stokes	AASHTO T 201	Máx.	2000	2000	2000
Ductilidad, 4° C, 5 cpm, mm	AASHTO T 51	Min.	500	500	250
Punto de Flama, ° C	AASHTO T 48	Min.	232.2	232.2	232.2
Solubilidad, %	AASHTO T 44	Min.	99	99	99
Endurecimiento, 25° C, 20 ipm, N-m	ASTM D 5801	Min.	0.429	0.629	0.629
Tenacidad, 25° C, 20ipm, N-m	ASTM D 5801	Min.	0.286	0.429	0.429
Ensayo del Residuo del Horno de Película Delgada (RTFOT) AASHTO T 179					
Viscosidad, 60° C, Poises	AASHTO T 202	Máx.	4000	8000	8000
Ductilidad, 39.2, 5 cpm, mm	AASHTO T 51	Min.	250	250	80
Endurecimiento, 25° C, 20ipm, N-m	ASTM D 5801	Min.	-	-	0.629
Tenacidad, 25° C, 20 ipm, N-m	ASTM D 5801	Min.	-	-	0.429

Fuente: Especificaciones Especiales para la Construcción de Carreteras y Puentes, Dirección General de Caminos, Guatemala, 2,000

Los agregados minerales deben ser compuestos por partículas limpias, duras y durables de piedra triturada (Basalto, granito o polvo de roca). El equivalente de arena según AASHTO T -176. El ensayo de desgaste de la grava SEGÚN AASHTO T- 96.

Como material rellenador o mineral fino se puede usar cemento Portland ó Cal hidratada. El porcentaje a usar es como máximo el 3% en peso de la mezcla.

La tolerancia es +/- 0.25%.

El agua debe estar totalmente libre de sales solubles nocivas, materia orgánica y otras propiedades no compatibles con la mezcla, según AASHTO T-263.

Los aditivos pueden agregarse a la emulsión de asfalto modificado, al agua o directamente a la mezcla, dependiendo del diseño de la emulsión.

BLOQUES DE CONCRETO

5.2.4.5 Adoquines

Los bloques o adoquines son elementos construidos con material pétreo y cemento, pudiendo tener varias formas, todas ellas regulares, y que son colocados sobre una cama de arena de 3 a 5 centímetros de espesor, la que tiene como función primordial absorber las irregularidades que pudiera tener la base, proporcionando a los adoquines un acomodamiento adecuado y ofreciendo una sustentación y apoyo uniforme en toda su superficie. Además sirve para drenar el agua que se filtra por las juntas, evitando que se dañe la base.

a) Materiales

Se usarán materiales que cumplan con la calidad de concreto hidráulico, indicados en este Capítulo, sección 5.3.

a.1) Subbase y base

Para los materiales a usarse en la subbase y base del adoquín, deben cumplir con la graduación indicada en la Norma AASHTO M-147.

a.2) Cama de arena:

Se usarán arenas naturales de río, arenas volcánicas o minerales, debiendo estar libres de arcilla, materia orgánica o cualquier otro material que pudiere interferir con el drenaje del agua proveniente de la superficie.

Su almacenaje debe evitar la contaminación y se debe proteger de la lluvia, a fin de mantener su contenido de humedad lo más uniforme posible.

a.3) Arena de sello:

Los adoquines se colocarán directamente sobre la arena, de manera que las juntas entre ellos no exceda los 5 milímetros. La arena de sello entre juntas de adoquines puede ser, de la misma usada para su lecho, cribada por el tamiz No. 8.

b) Ensayos de laboratorio del adoquín

Después de construido el adoquín, será necesario hacerle determinadas pruebas para comprobar si el diseño de la mezcla cumple los requisitos de resistencia y propiedades requeridas.

b.1) Examen visual, forma y medidas: para este análisis, las medidas se deben tomar con una aproximación de +/- 1 milímetro.

b.2) Absorción: Debido a la correlación existente con la resistencia del adoquín, se indica que si aumenta la absorción, disminuye la resistencia a la compresión. El porcentaje de absorción determinado en una muestra, será comparado con un porcentaje patrón, el cual haya sido determinado de un adoquín del cual se ha obtenido una alta resistencia a la compresión.

b.3) Resistencia al desgaste:, se indica que en el ensayo normal, la pérdida volumétrica no debe exceder de 15 cm^3 / 50 cm^2 y la disminución de espesor no debe ser mayor de 3 centímetros.

5.3 Elementos que integran el Pavimento Rígido

5.3.1 Subrasante

Conforme lo indicado en el numeral 5.2.2 de esta sección.

5.3.2 Subbase

Conforme lo indicado en el numeral 5.2.1 de esta sección.

5.3.3 Superficie de rodadura

Es la capa superior de la estructura de pavimento, construida con concreto hidráulico, por lo que debido a su rigidez y alto módulo de elasticidad, basan su capacidad portante en la losa, más que en la capacidad de la subrasante, dado que no usan capa de base. En general, se puede indicar que el concreto hidráulico distribuye mejor las cargas hacia la estructura de pavimento.

Los pavimentos rígidos pueden dividirse en tres tipos:

i. Concreto hidráulico simple

No contiene armadura en la losa y el espaciamiento entre juntas es pequeño (entre 2.50 a 4.50 metros ó 8 a 15 pies). Las juntas pueden o no tener dispositivos de transferencia de cargas (dovelas).

ii. Concreto hidráulico reforzado

Tienen espaciamientos mayores entre juntas (entre 6.10 y 36.60 metros ó 20 a 120 pies) y llevan armadura distribuida en la losa a efecto de controlar y mantener cerradas las fisuras de contracción.

iii. **Concreto hidráulico reforzado continuo**

Tiene armadura continua longitudinal y no tiene juntas transversales, excepto juntas de construcción. La armadura transversal es opcional en este caso. Estos pavimentos tienen más armadura que las juntas armadas y el objetivo de esta armadura es mantener un espaciamiento adecuado entre fisuras y que éstas permanezcan cerradas.

a) Materiales

a.1) Cemento tipo Portland:

Los cementos hidráulicos deben ajustarse a las Normas AASHTO M-85 para los Cementos Portland y a las normas AASHTO M-240, para Cementos Hidráulicos Mezclados.

El cemento Portland debe cumplir con las especificaciones indicadas en la tabla 5-12.

Tabla 5-12
Especificaciones para el Cemento Portland

AASHTO	Referencia
T – 89	Finura del cemento (por turbidimetro)
T – 105	Composición química del cemento
T – 106	Resistencia a la compresión del mortero del cemento
T – 107	Expansión del cemento en autoclave
T – 127	Muestreo del cemento
T – 131	Tiempo de fraguado (agua de Vicat)
T – 137	Contenido de aire del mortero de cemento
T – 153	Finura del cemento (permeámetro)
T – 154	Tiempo de fraguado (aguja de Gilmore)
T - 186	Endurecimiento inicial del cemento

Fuente: Manual Centroamericano de Especificaciones para la Construcción de Carreteras y Puentes regionales, SIECA, 2,001.

Además, se debe indicar su clase de resistencia en MPa o en lbs/pulg^2, según sea el caso, 21, 28, 35 y 42 MPa (3000, 4000, 5000 y 6000 lb/pulg^2), que corresponde a una resistencia mínima a 28 días.

Cuando no se especifique el cemento a usar, éstos deberán tener una clase de resistencia de 28 MPa (4000 lb/pulg^2) o mayor.

a.2) Agregados finos:

Debe consistir en arena natural o manufacturada, compuesta de partículas duras y durables, de acuerdo a AASHTO M 6, clase B.

a.3) Agregados gruesos:

Deben consistir en gravas o piedras trituradas, trituradas parcialmente o sin triturar, procesadas adecuadamente para formar un agregado clasificado, de acuerdo con AASHTO M 80.

a.4) Agua:

El agua para mezclado y curado del concreto o lavado de agregados debe ser preferentemente potable, limpia y libre de cantidades perjudiciales de aceite, ácidos, álcalis, azúcar, sales como cloruros o sulfatos, material orgánico y otras sustancias que puedan ser nocivas al concreto o al acero. El agua de mar o salóbregas y de pantanos, no deben usarse para concreto hidráulico.

El agua proveniente de abastecimientos o sistemas de distribución de agua potable, puede usarse sin ensayos previos.

En donde el lugar de abastecimiento sea poco profundo, la toma debe hacerse de forma que excluya sedimentos, toda hierba y otras materias perjudiciales.

b) Aditivo

El uso de aditivos para concreto, tiene por objeto mantener y mejorar esencialmente la composición y rendimiento del concreto de la mezcla básica.

b.1) Ceniza Volante: Se ha usado ceniza volante para mezclas del sistema de pavimentos de concreto de apertura rápida, pero generalmente como un aditivo y no como sustituto del cemento Portland y debe cumplir con lo estipulado en AASHTO M-295.

b.2) Aditivos Químicos: Son aquellos que sin cambiar las características naturales del concreto hidráulico para pavimentos, ayudan en los diferentes procesos de construcción, siendo estos: inclusores de aire según AASHTO M-159, reductores de agua según AASHTO M-194, acelerantes y descelerantes de fraguado según AASHTO M-194.

CAPÍTULO 6

DRENAJES

La humedad es una característica muy especial de los pavimentos, ya que ésta reviste gran importancia sobre las propiedades de los materiales que forman la estructura de un pavimento y sobre el comportamiento de los mismos. El objeto de este capítulo es analizar los distintos métodos por medio de los cuales se busca reducir ó eliminar el agua en la estructura de un pavimento.

El drenaje de agua en los pavimentos, debe ser considerado como parte importante en el diseño de carreteras. El exceso de agua combinado con el incremento de volúmenes de tránsito y cargas, se anticipan con el tiempo para ocasionar daño a las estructuras de pavimento.

6.1 Definiciones de drenaje en pavimentos

El agua penetra dentro de la estructura del pavimento por muchos medios, tales como grietas, juntas ó infiltraciones del pavimento ó como corriente subterránea de un acuífero interrumpido, elevando el nivel freático ó como fuente localizada (sin drene, atrapada, etc).

6.1.1 Efectos del agua sobre el pavimento

Los efectos de esta agua (cuando está atrapada dentro de la estructura) sobre el pavimento son los siguientes:

a) Obligadamente reduce la resistencia de los materiales granulares.

b) Reduce la resistencia de los suelos de la subrasante cuando ésta se satura y permanece en similares condiciones durante largos períodos.

c) Succiona los suelos de apoyo de los pavimentos de concreto con las consiguientes fallas, grietas y el deterioro de hombros.

d) Succiona los finos de los agregados de las bases que están bajo los pavimentos flexibles, haciendo que las partículas de suelo se desplacen con los resultados de pérdida de soporte por la erosión provocada .

Con menor frecuencia, se suceden problemas de agua incluida y atrapada, pero no se limitan a ello, tales como:

e) Degradación de la calidad del material del pavimento por efecto de la humedad, creando desvestimiento de las partículas del mismo.

f) Los diferenciales que se producen con el desplazamiento dado por el hinchamiento de los suelos.

g) Por la expansión y contracción debida al congelamiento de los suelos.

6.1.2 Soluciones a los problemas de humedad en pavimentos

Los métodos para considerar el agua en el diseño de pavimentos, consisten básicamente en lo siguiente:

a) Prevenir la penetración de agua dentro del pavimento.

b) Proveer el drenaje necesario para remover el exceso de agua rápidamente.

c) Construir pavimentos fuertes para resistir los efectos combinados de cargas y agua.

En el diseño de pavimentos, debe siempre tratarse de que tanto la subrasante, subbase y base estén protegidas de la acción del agua. Al considerar las posibles fuentes de agua, es conveniente proteger la sección estructural de pavimento de la entrada de agua, por lo que es necesario interceptar el agua que corre superficialmente lo mejor posible, así como sellar la superficie del pavimento.

Generalmente se da una considerable atención al efecto de interceptar el agua superficial, mientras se da una menor atención al sellado de la superficie para evitar la infiltración de lluvia. Como resultado, una

considerable cantidad de agua a menudo penetra dentro de la parte inferior de la estructura de pavimento, obligando la necesidad de construir algún tipo de drenaje.

Para obtener un adecuado drenaje del pavimento, se debe considerar en el diseño, la provisión de tres tipos de sistemas de drenaje para el control ó la reducción de los problemas causados por el agua:

- Drenaje superficial.
- Subdrenajes.
- Estructuras de drenaje.

Dichos sistemas de drenaje son efectivos para el desalojo del agua libre; esto causa fuerzas capilares en los suelos y en los agregados finos que no pueden ser drenados. Los efectos de esta obligada humedad debe ser considerada en el diseño de estructuras de pavimento y el efecto que esto tiene sobre las propiedades de los materiales. La mayor parte de los pavimentos existentes no incluyen sistemas de drenaje capaces de remover rápidamente el agua libre.

Los métodos de diseño de pavimentos, dependen de la práctica de construir pavimentos fuertes para resistir el efecto combinado de cargas y agua. Cualquiera de ellos no siempre toman en cuenta los efectos potenciales de destrucción que tiene el agua dentro de la estructura de pavimento; por lo cual se hace énfasis en la necesidad de excluir el agua del pavimento y proveer un rápido drenaje.

6.1.3 Consideraciones de drenaje en el diseño de pavimentos

Un buen drenaje mantiene la capacidad soporte de la subrasante (mantiene el módulo de resiliencia cuando la humedad es estable) lo que hace un camino de mejor calidad, así como permite en determinado momento el uso de capas de soporte de menor espesor.

En la tabla 6-1 se dan los tiempos de drenaje que recomienda AASHTO. Dichas recomendaciones se basan en el tiempo que es necesario para que la capa de base elimine la humedad cuando ésta tiene un grado de saturación del 50 % ; pero es de hacer notar que un grado de saturación del 85 % reduce en buena medida el tiempo real necesario para seleccionar la calidad de un drenaje.

Tabla 6-1
Tiempos de drenaje para capas granulares

Calidad del Drenaje	50% saturación	85% saturación
Excelente	2 horas	2 horas
Bueno	1 día	2 a 5 horas
Regular	1 semana	5 a 10 horas
Pobre	1 mes	de 10 a 15 horas
Muy pobre	El agua no drena	mayor de 15 horas

Fuente: Guía para Diseño de Pavimentos, AASHTO 1,993

a) Coeficientes de drenaje para pavimentos flexibles (m_x)

La calidad del drenaje es expresado en la fórmula del número estructural, por medio del coeficiente de drenaje (m_x), que toma en cuenta las capas no ligadas.

Tabla 6-2
Coeficientes de drenaje para pavimentos flexibles (m_x)

Calidad del drenaje	P = % del tiempo en que el pavimento está expuesto a niveles de humedad cercanos a la saturación			
	< 1%	1% - 5%	5% - 25%	> 25%
Excelente	1.40-1.35	1.35-1.30	1.30-1.20	1.20
Bueno	1.35-1.25	1.25-1.15	1.15-1.00	1.00
Regular	1.25-1.15	1.15-1.05	1.00-0.80	0.80
Pobre	1.15-1.05	1.05-0.80	0.80-0.60	0.60
Muy pobre	1.05-0.95	0.95-0.75	0.75-0.40	0.40

Fuente: Guía para Diseño de Pavimentos, AASHTO 1,993

b) Coeficientes de drenaje para pavimentos rígidos (C_d)

En el diseño de pavimentos rígidos se utilizan los coeficientes de drenaje (C_d), según tabla 6-3, los cuales ajustan la ecuación de diseño que considera la resistencia de la losa, las tensiones y las condiciones de soporte.

Tabla 6-3
Coeficientes de drenaje para pavimentos rígidos (C_d)

Calidad del drenaje	P = % del tiempo en que el pavimento está expuesto a niveles de humedad cercanos a la saturación			
	< 1%	1% - 5%	5% - 25%	> 25%
Excelente	1.25-1.20	1.20-1.15	1.15-1.10	1.10
Bueno	1.20-1.15	1.15-1.10	1.10-1.00	1.00
Regular	1.15-1.10	1.10-1.00	1.00-0.90	0.90
Pobre	1.10-1.00	1.00-0.90	0.90-0.80	0.80
Muy pobre	1.00-0.90	0.90-0.80	0.80-0.70	0.70

Fuente: Guía para Diseño de Pavimentos, AASHTO 1,993

c) Selección del coeficiente

Para seleccionar el coeficiente de la tabla (tabla 6-2 ó tabla 6-3), es necesario seguir las siguientes indicaciones:

a.1) Se calcula el tiempo de drenaje de cada una de las capas no ligada para pavimentos flexibles ó de la subbase combinada con la subrasante para el caso de pavimentos rígidos.

a.2) Se selecciona una calidad de drenaje en función del tiempo de drenaje calculado.

a.3) Calcular el tiempo en que la estructura de pavimento va a estar expuesta a niveles de humedad próximos a saturarse.

a.4) Con la calidad de drenaje y el porcentaje de tiempo en que el pavimento va a estar expuesto a niveles de humedad cercanos a la saturación, se selecciona el coeficiente de drenaje m_x ó Cd según sea el tipo de pavimento que se esté calculando.

d) Tiempo de drenaje

Existen dos formas de calcular el tiempo de drenaje para la capa de un pavimento, y estas son: la aproximación del tiempo para drenar y la del caudal constante. En el primero, el método del tiempo para drenar se

considera únicamente el agua que se infiltra y en el segundo se consideran las fuentes de ingreso y egreso y las mismas son cuantificables y la base permeable se dimensiona para conducir los caudales de diseño.

6.1.4 Método del tiempo para drenar

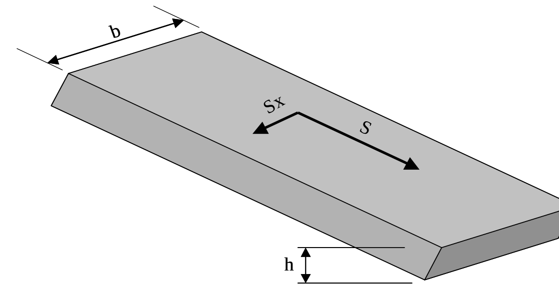
El agua de lluvia que se infiltra en la superficie de un pavimento, llega hasta el nivel de la base, la cual al estar en contacto con ella la satura completamente; en este proceso de saturación llega el momento en que la estructura de pavimento al saturarse completamente, ya no permite el ingreso de agua dentro de ella, entonces el agua que sigue tratando de penetrar se escurre sobre la superficie; de aquí que se debe tomar muy en cuenta que la base debe ser perfectamente permeable, ya que una vez termina de llover, el agua debe escurrirse de la base lo más rápido posible, con el objeto de que la saturación de los materiales no cambie las características mecánicas de la capa.

El tiempo para que el agua se escurra de los materiales, depende en buena forma del posible daño que se pudiera ocasionar y las condiciones climáticas de la zona. Para el caso, es conveniente que la estructura de pavimento se drene en el lapso de media ó una hora como máximo, esto con el objeto de que el posible daño que se pueda ocasionar sea el mínimo, por el efecto que se produce el estar mucho tiempo en presencia de la humedad

Los datos necesarios para efectuar el análisis con respecto a la geometría de una base permeable deben ser:

- Pendiente longitudinal (S)
- Pendiente transversal (S_x)
- Espesor de la capa a drenar (h)
- Ancho de la base permeable (b)

Figura 6-1
Geometría de una base permeable



Longitud resultante de la base: $Lr = b [(S / S_x)^2 + 1]^{0.5}$

Pendiente transversal resultante de la base: $S_r = (S^2 + S_x^2)^{0.5}$

Factor de pendiente longitudinal: $S = (Lr \times S_r) / b$

Dentro de las propiedades que debe tener una base filtrante, se deben conocer las siguientes características:

- Porcentaje de finos
- Tipo de finos

Si los finos son inertes:	el IP debe ser < del 1%
Si son limosos:	el IP es > de 1% , pero por debajo de la línea "A" del gráfico de plasticidades
Si son arcillosos:	el IP es alto, y se encuentra sobre la línea "A" de la carta de plasticidad

D_{10} = Tamaño efectivo de las partículas
Y = Densidad seca
IP = Índice de plasticidad

La gravedad especifica (G_s) de los sólidos es:

$$G_s = Ws / Vs$$

En donde:

Ws = Peso específico de los sólidos
Vs = Volumen total de los sólidos

Para cuantificar las propiedades drenantes de un pavimento es necesario realizar los siguientes cálculos:

1) Suponiendo que V_1 (Volumen total) = 1 (asumido)
2) Calcular Vs = Ws / Gs
3) Calcular Vv (Volumen de vacíos) = V_1 – Vs = N_{emax} (Volumen de agua que llena completamente los vacíos del material)
4) Con la tabla 6.4 se selecciona la pérdida de agua C :

Tabla 6.4
Cantidad de agua que puede drenar por gravedad

Material predominante	Cantidad de finos								
	< 2.5%			2.5% - 5%			5% - 10%		
	Tipo de finos			Tipo de finos			Tipo de finos		
	Filler	Limo	Arcilla	filler	limo	Arcilla	filler	limo	Arcilla
Grava	70	60	40	60	40	20	40	30	10
Arena	57	50	35	50	35	15	35	18	- 8

Fuente: Diseño Estructural de Caminos, Universidad Nacional de San Juan, Argentina, 1994

5) Calcular la porosidad efectiva (N_c):

$$N_c = N_{emax} C / 100$$

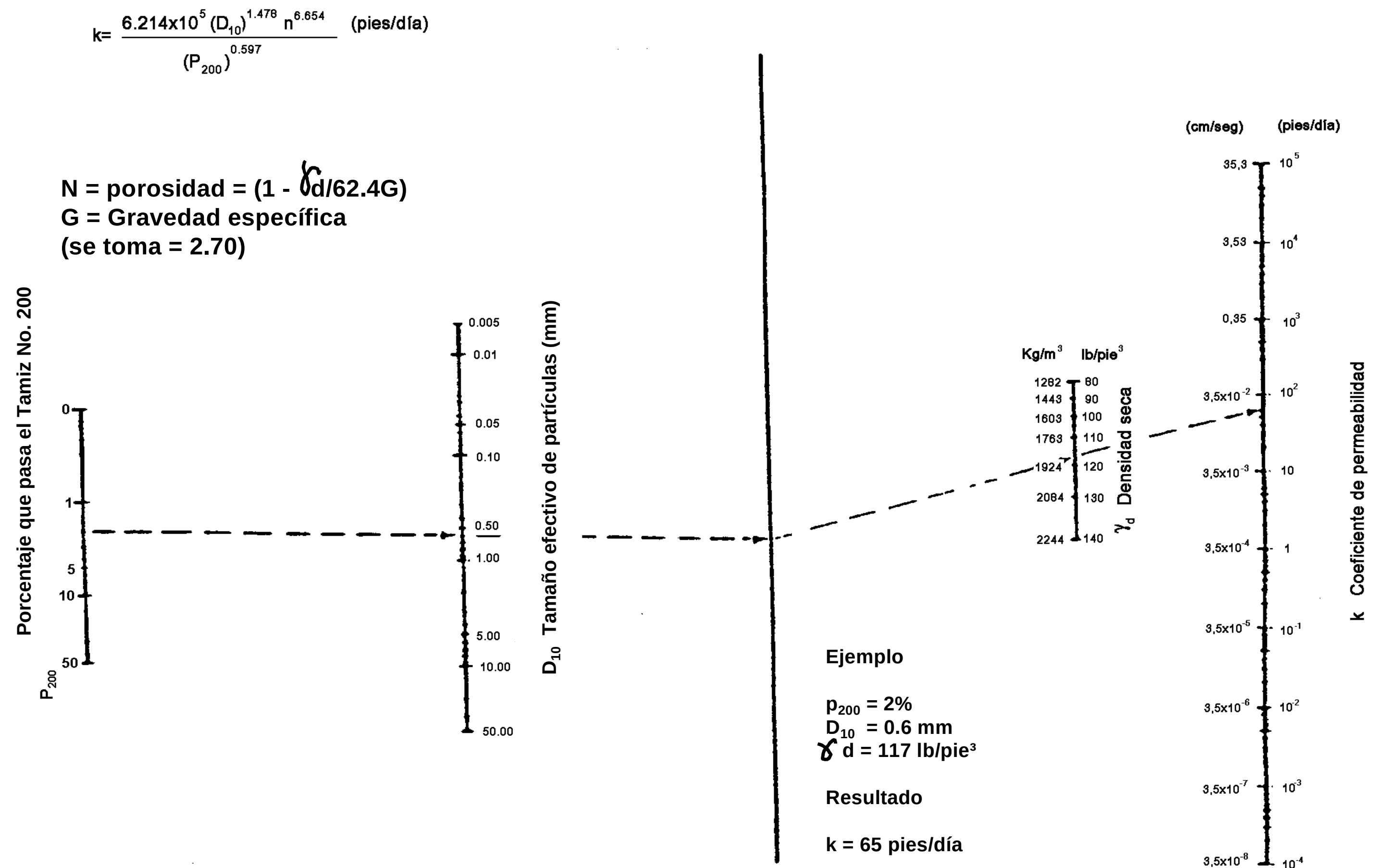
La porosidad efectiva es un concepto muy importante, ya que es la relación entre el volumen de agua que drena de un material por efecto de la gravedad y el volumen total de ese material. Es la medida de la cantidad de agua que puede ser drenada de un suelo.

6) Calcular m_x (coeficiente de drenaje para pavimento flexible):

$$m_x = N_c \times L_r^2 / (h \times k)$$

La permeabilidad k se determina con el ábaco de la figura 6-2.

Figura 6-2
Cálculo de la Permeabilidad k

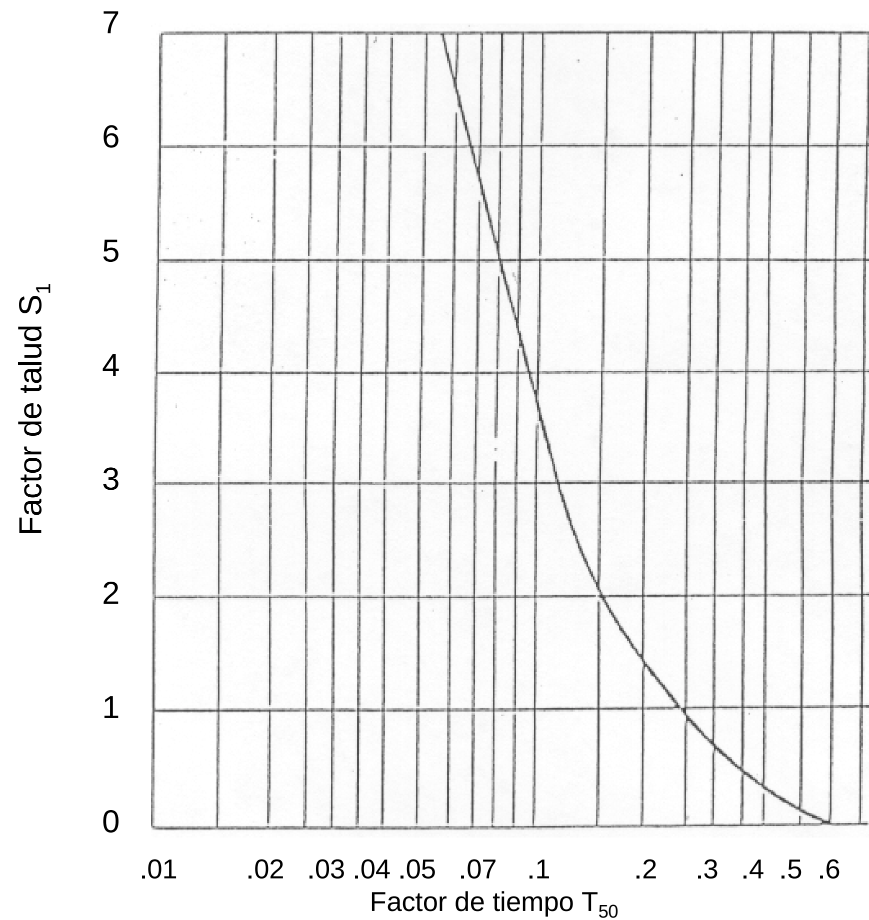


Fuente: Diseño Estructural de Caminos, Universidad Nacional de San Juan, Argentina, 1,994

El tiempo de drenaje y los niveles de saturación, se determinan con los valores obtenidos de la siguiente manera:

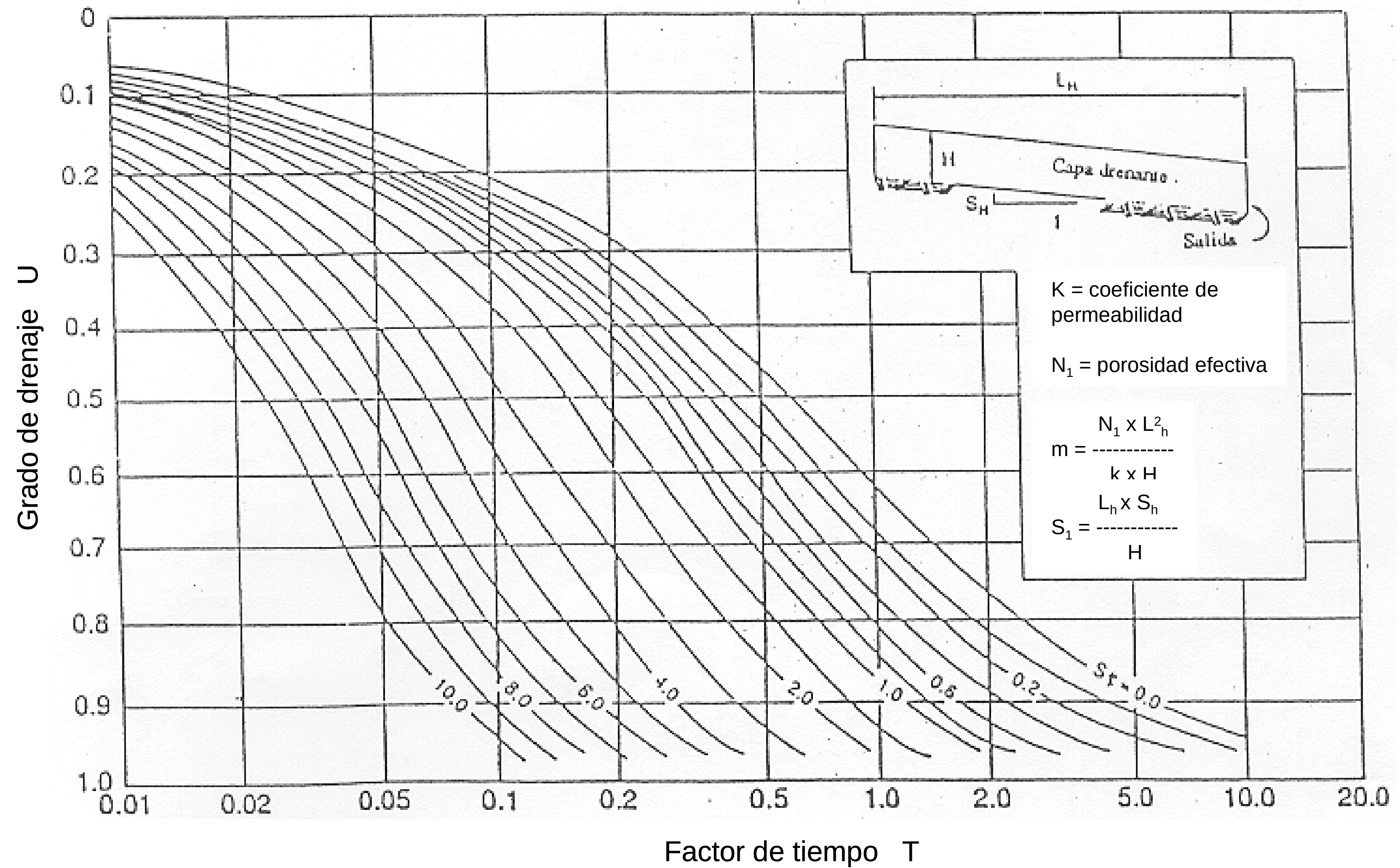
7) De la figura 6-3 se selecciona un factor de tiempo T, función de S_1 y en la figura 6-4, los grados de drenaje U.

Figura 6-3
Factor de tiempo para un drenaje del 50%



Fuente: Diseño Estructural de Caminos, Universidad Nacional de San Juan, Argentina, 1,994

Figura 6-4
Factores de tiempo para drenaje de capas saturadas



Fuente: Diseño Estructural de Caminos, Universidad Nacional de San Juan, Argentina, 1,994

8) Se calcula el tiempo de drenaje t en horas

$$t = T \ x \ m_x \ x \ 24 \text{ horas}$$

9) Se calcula el agua drenada durante cada período de tiempo, multiplicando la porosidad efectiva Nc por U.

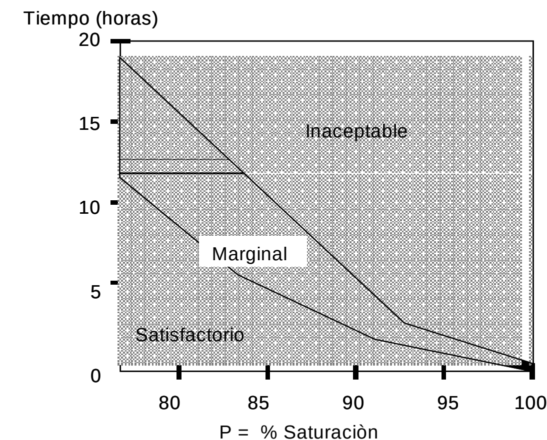
10) Para cada período de tiempo debe calcularse la cantidad de agua remanente en la muestra, sustrayendo el agua drenada durante cada período (Nc x U) del volumen de agua que llena completamente los vacíos de la capa drenante (Vv).

11) Determinar el nivel de saturación (%) de la capa drenante en cada intervalo de tiempo haciendo:

$$P = (Vv – (Nc \ x \ U)) / (N_{emax} \ x \ 100) = \% \text{ de saturación}$$

Los valores de t en horas y el porcentaje de saturación se grafican para determinar la capacidad de la base como elemento drenante. De acuerdo a la clasificación podrá ser aceptable, marginal ó inaceptable. Figura 6-5.

Figura 6-5
Criterio de drenajes para capas granulares



Fuente: Diseño Estructural de Caminos, Universidad Nacional de San Juan, Argentina, 1,994

Al graficar los valores del calculo, esta figura da la correlación que existe entre el porcentaje de saturación y el tiempo en horas, en que una capa de base tiene la posibilidad de drenarse, por ejemplo: un suelo que esta al 80% de saturación y se drena en 5 horas, es un suelo satisfactorio como capa filtrante. Un suelo que tiene el 85% de saturación y se drena en 10 horas, es un suelo marginal en la grafica, ó sea que no es bueno pero tampoco es malo como capa filtrante. Un suelo que tiene 95% de saturación y se drena en 15 horas, es un suelo inaceptable como capa filtrante.

En la Tabla 6-1 se analiza la calidad del drenaje con dos porcentajes de saturación y los tiempos permisibles para que una capa drene adecuadamente. Con el porcentaje de saturación y la calidad del drenaje, se determina el coeficiente adecuado para una base, conforme las tablas 6-2 y 6-3.

6.1.5. Método del caudal constante

Este método se basa en la suposición de que existe un caudal uniforme de filtración y que el sistema de drenaje debe ser diseñado para drenar esa agua. Este método tiene como su mayor defecto la dificultad de poder determinar la cantidad de agua que entra y la que sale; una solución real, será el poder evaluar todas las fuentes de agua que se mueven dentro del pavimento, con lo que tendríamos:

$$qn = qi + qg + qs + qm - qv$$

en donde:

qn = Caudal total de entrada
qi = Caudal de infiltración
qg = Caudal de entrada por efecto de la gravedad
qs = Caudal de entrada por flujo artesiano
qm= Caudal por derretimiento del hielo
qv = Caudal de salida por flujo vertical

6.1.5.1 Porcentaje de tiempo en que el pavimento está expuesto a niveles de humedad próximos a la saturación.

En el cálculo de porcentaje del tiempo, en que el pavimento esta próximo a la saturación, no debe considerarse el período de tiempo en el año que el pavimento está congelado (en el caso de lugares que tengan esta época); también el período del año en que es la época seca del lugar, ya que una lluvia ocasional incrementa muy poco el contenido de humedad de un suelo seco y no provoca saturación. El índice de Thorntwaite es un valor que ayuda a determinar los niveles de humedad; valores negativos indican períodos largos secos mientras que valores positivos indican períodos secos cortos.

El período de paso de la época lluviosa a seca incluye parte del tiempo en el cual se ha estado próximo a la saturación, para pavimentos construidos en áreas húmedas y frías; la cantidad de días de lluvia se pueden conseguir de datos meteorológicos; el porcentaje de tiempo en que el pavimento esta próximo a la saturación es:

$$P = ((S + R) \times 100) / 365$$

En donde:

P = Porcentaje del tiempo en el que el pavimento está próximo a la saturación
S = Días de traslape entre la época lluviosa y seca
R = Días con lluvia en que el pavimento puede drenar hasta el 85% del estado de saturación en 24 horas ó menos. Si el tiempo del drenaje excede de 24 horas, entonces deben usarse los días de lluvia multiplicados por el tiempo de drenaje en días.

Para el caso se analiza el siguiente ejemplo:

Una carretera de cuatro carriles con separador central; el pavimento es de concreto hidráulico simple, con juntas transversales separadas cada 4.90 metros (15 pies); la subrasante es un suelo clasificado A-6 (19); la profundidad del nivel friático oscila entre 1.20 y 1.80 metros (4 a 6 pies) y dependiendo de la época, puede llegar a estar a nivel de la rasante. Las características de granulometría de las capas que componen la estructura de pavimento son como en la tabla siguiente:

Tabla 6-5
Granulometría de la estructura del pavimento (% que pasa)

Tamiz		Subrasante	filtro	Subbase permeable
38.1 mm	1 ½”	100	100	100
25.0 mm	1”	100	98	94
19.0 mm	¾”	100	95	87
12.5 mm	½”	100	90	78
4.75 mm	No. 4	100	72	44
4.50 mm	No. 40	77	25	25
0.075 mm	No. 200	32	7	5

Fuente: Datos asumidos para el ejemplo.

Además los siguientes datos:

Pendiente resultante:	Sr = 0.02 mm/ m
Longitud resultante:	Lr = 7.30 m (20 pies)
Espesor de la Base:	h = 152 mm (6´´)
Porosidad efectiva:	Nc = 0.25
Coeficiente de permeabilidad:	k = 610 m/ día (2000 pies/ día)
Volumen de vacíos:	Vv = 0.30

Con esta información calculamos:

1) El tiempo de drenaje para el material de subbase
2) Estimación del tiempo en que la subbase esta saturada
3) Determinación del coeficiente de drenaje para un pavimento rígido
4) Examen del diseño del filtro

Se calcula el factor de pendiente longitudinal:

$$S_l = (L_r \text{ x } S_r) / h = (7.3 \text{ x } 0.02) / 0.152 = 0.96$$

Con este S_l el factor de tiempo T 50 es de T=0.245 (figura 6-3)

Seguidamente se calcula el factor de drenaje

$$m = (N_c \text{ x } L_r^2 \ / (h \text{ x } k)) = ((\ 0.25 \text{ x } 7.3^2\ ) / (\ 0.152 \text{ x } 610\ )) = 0.144$$

El tiempo para drenar la capa será:

$$t = T \times m \times 24 = 0.245 \times 0.144 \times 24 = 0.85$$

Asumiendo que hay 19 días de traslape entre la época lluviosa y la seca y 22 días con lluvia, el tiempo en el que el pavimento está próximo a saturarse es de:

$$P = ((S + R) * 100) / 365 = ((19 + 22) * 100) / 365 = 11.20\ \%$$

Como el tiempo para drenar es de 0.85 horas y la calidad del drenaje es excelente, debe de usarse un coeficiente de drenaje para un P = 11.2% igual a Cd = 1.15 de la tabla 6-3.

Es necesario verificar la granulometría de los materiales en lo que respecta a condiciones de filtro:

D_{15} capa de transición / D_{85} subrasante = D_{15} F/D_{85} M = 0.18 / 0.70 = 0.25 < 5

D_{50} capa de transición / D_{50} subrasante = D_{50} F/D_{50} M = 1.60 /0.15 = 10.70 < 25

D_{15} base / D_{15} capa de transición = D_{15} F/D_{85} M = 2.50 / 9.00 = 0.30 < 5

D_{50} base / D_{50} capa de transición = D_{50} F/ D_{50} M = 6.00/1.60 = 3.75 < 25

De estos datos, se determina que el filtro es adecuado.

6.2 Drenaje en pavimentos

El objeto de este capítulo es evaluar el análisis del drenaje en el diseño de pavimentos, con el objeto de eliminar la posibilidad de la reducción de la vida útil de pavimento por el efecto que produce el agua al presentarse dentro del paquete estructural; en todos y cada uno de los casos en que se prevean problemas de humedad deberán diseñarse estructuras de drenaje tales como: bases drenantes, drenajes colectores del agua (cunetas), filtros laterales de transición elaborados con materiales granulares ó geotextiles (Subdrenajes).

6.2.1 Coeficiente de drenaje AASHTO

Los coeficientes de drenaje son: valores menores, iguales ó mayores a la unidad, esto depende de la calidad percolante de las capas de drenaje; al tener capas de drenaje con valores mayores que la unidad, entonces es factible la posibilidad de diseñar paquetes estructurales con espesores menores; en el caso que el drenaje no es bueno, el coeficiente es menor que la unidad lo que obligara a diseñar un paquete estructural con mayor espesor, que permita resistir en igualdad de condiciones el tránsito para el que fue diseñado; un mayor espesor de paquete estructural, no garantiza el tener un buen drenaje.

6.2.2 Análisis de drenaje

En el análisis de drenaje, es necesario estudiar todas las granulometrías y permeabilidades de los materiales que se tengan en el proyecto; esta permeabilidad se puede determinar tanto en el lugar como en laboratorio. Será necesario también calcular la capacidad de los drenajes longitudinales, tanto las cunetas así como los subdrenajes, con el fin de conocer su capacidad de evacuación de las aguas; para el caso, es necesario que los drenajes deben diseñarse para evacuar el agua por lo menos en un período de dos horas ó menos, posteriores a la finalización de la lluvia; un buen sistema de drenajes tiene que aumentar su capacidad drenante desde el material que esta aguas arriba hacia el material que esta aguas abajo.

En el caso de la utilización de telas tipo geotextil como filtro de las capas drenantes, se deben considerar los siguientes propiedades:

1) Retención de las partículas de suelo

2) Permeabilidad

3) Capacidad de taponamiento

4) Resistencia a los agentes químicos

5) Fácil maniobrabilidad y durabilidad

Las bases que son permeables, son excelentes para permitir la evacuación rápida del agua de una estructura de pavimento, antes de que la condición de saturación dañe el comportamiento de la capa. Estas bases permeables pueden estar construidas con materiales estabilizados ó no, ya que en una buena base drenante, el agua libre no debe permanecer más de dos horas después de que finalizó la lluvia.

Al efectuar la construcción de una carretera, es necesario prever un buen sistema de colectores longitudinales que tengan el diámetro requerido y tengan relación directa con el aporte de agua de la base; siempre que sea posible, es conveniente que el agua drenada de la base no escurra sobre los taludes.

Los materiales de los agregados de la base permeable, deben ser resistentes, durables. Es recomendable que la permeabilidad sea de 1,000 pies/ día (305 m/ día = 0.35 m/ seg.).

Las bases drenantes estabilizadas se pueden construir con cemento hidráulico ó con cemento asfáltico; el cemento Portland se puede colocar en una cantidad entre 80 a 170 kg/ m^3 (175 a 375 lbs/ m^3). En las bases no estabilizadas es necesario que al momento de la construcción, se evite el desplazamiento y la segregación del material, para evitar la contaminación con finos después de su colocación.

La compactación de una base granular, tiene por objeto construir una capa durable y resistente sin que pierda su capacidad drenante; el espesor mínimo de ésta debe ser de 10 centímetros (4”) y debe tener un sobre ancho de por lo menos de 0.30 a 0.90 metros más que el ancho de rodadura en los laterales, con el objeto de permitir el apoyo del equipo de pavimentación. Para capas de transición es recomendable utilizar un espesor mínimo de 10 centímetros (4”).

CAPÍTULO 7

DISEÑO DE ESPESORES

Introducción

En este capítulo, se describen los procedimientos para el diseño de pavimentos tanto flexibles como rígidos. El diseño de pavimentos flexibles incluye la superficie con concretos o mezclas asfálticas y el diseño de pavimentos rígidos con superficie de concreto hidráulico con juntas.

El concepto del diseño de pavimentos tanto flexibles como rígidos, es determinar primero el espesor de la estructura basado en el nivel de tránsito como en las propiedades de los materiales; el período de desempeño de un pavimento esta en función de la pérdida de serviciabilidad.

7.1 Pavimentos flexibles

Para el diseño de espesores en pavimentos flexibles, descritos en este manual, se usarán dos tipos de métodos, los cuales son los siguientes:

- Método de AASHTO, 1,993.
- Método del Instituto de Asfalto.

7.1.1 Método de AASHTO.

Para el método de AASHTO la fórmula de diseño es:

$$\mathrm{Log}_{10}W_{18} = Z_r\ S_o + 9.36\ \mathrm{Log}_{10}(SN+1) - 0.20 + \frac{\mathrm{Log}_{10}\left(\dfrac{\Delta PSI}{4.2-1.5}\right)}{0.40 + \dfrac{1094}{(SN+1)^{5.19}}} + 2.32\ \mathrm{Log}_{10} M_r - 8.07$$

En donde:

W_{18} = Número de cargas de ejes simples equivalentes de 18 kips (80 kN) calculadas conforme el tránsito vehicular.
Zr = Es el valor de Z (área bajo la curva de distribución) correspondiente a la curva estandarizada para una confiabilidad R.
So = Desviación estándar de todas las variables.
ΔPSI = Pérdida de serviciabilidad.
Mr = Módulo de resiliencia de la subrasante.
SN = Número Estructural

a) Las variables que se tienen que considerar en este método, serán las siguientes:

i. Variables en función del tiempo.

Existen dos variables que deben tomarse en cuenta y son:

- El período de diseño.
- La vida útil del pavimento

El período de diseño: es el tiempo total para el cual se diseña un pavimento en función de la proyección del tránsito y el tiempo que se considere apropiado para que las condiciones del entorno se comiencen a alterar desproporcionadamente.

La vida útil del pavimento, es aquel tiempo que transcurre entre la construcción del mismo y el momento en que alcanza el mínimo de serviciabilidad.

El período de diseño puede llegar a ser igual a la vida útil de un pavimento; en los casos en que se consideren reconstrucciones ó rehabilitaciones a lo largo del tiempo, el período de diseño comprende varios períodos de vida útil que son: el de pavimento original y el de las rehabilitaciones.

Se recomiendan períodos de diseño en la siguiente forma:

Tabla 7-1
Períodos de diseño

Tipo de Carretera	Período de Diseño
Autopista Regional	20 – 40 años
Troncales suburbanas	15 – 30 años
Troncales Rurales	
Colectoras Suburbanas	10 – 20 años
Colectoras Rurales	

Fuente: Manual Centroamericano de Normas para el Diseño Geométrico de las Carreteras Regionales, SIECA, 2,001

ii. Variables en función del tránsito.

Esta variable es la calculada en el capítulo 3 de este manual, que es el número de repeticiones de ejes equivalentes de 18 kips (80 kN) ó ESAL´s. La conversión de una carga dada por eje a eje equivalente ó ESAL´s se hace a través de los factores equivalentes de carga (LEF`s).

iii. Confiabilidad (R).

Este valor se refiere al grado de seguridad ó veracidad de que el diseño de la estructura de un pavimento, puede llegar al fin de su período de diseño en buenas condiciones. .

iv. Subrasantes expansivas

En el caso de existir subrasantes expansivas por efecto de la saturación, es necesario analizar la pérdida de serviciabilidad (ΔPSI) debido a esta causa, haciendo los análisis de laboratorio a los materiales existentes en el proyecto.

v. Criterios para determinar la serviciabilidad.

La serviciabilidad de una estructura de pavimento, es la capacidad que tiene éste de servir al tipo y volumen de tránsito para el cual fue diseñado. El índice de serviciabilidad se califica entre 0 (malas condiciones) y 5 (perfecto).

Para el diseño de pavimentos debe asumirse la serviciabilidad inicial y la serviciabilidad final; la inicial (p_o) es función directa del diseño de la estructura de pavimento y de la calidad con que se construye la carretera, la final ó terminal (pt) va en función de la categoría del camino y se adopta en base a esto y al criterio del diseñador; los valores que se recomiendan por experiencia son:

Serviciabilidad inicial.

Po = 4.5 para pavimentos rígidos
Po = 4.2 para pavimentos flexibles

Serviciabilidad final[1].

Pt = 2.5 ó más para caminos principales
Pt = 2.0 para caminos de tránsito menor

vi. Propiedades de los materiales.

En el capítulo 4 se consideraron las propiedades de los materiales, que son las que se valoran para obtener el módulo de resiliencia, ya que en función de éste se llega a los coeficientes de los números estructurales (SN).

vii. Drenajes.

En el capítulo 6, se estudian estos valores con el método de AASHTO y son los coeficientes de capa, los cuales se ajustan con factores mayores ó menores que la unidad para tomar en cuenta el drenaje y el tiempo en que las capas granulares están sometidas a niveles de humedad cerca de la saturación.

b) Determinación de espesores.

En el inciso a) se presentó la fórmula de diseño para pavimentos flexibles y las variables (numerales del i al vii) que intervienen en ella; ésta fórmula puede resolverse en forma manual, lo cual resulta bastante complicado. Por medio electrónico de cálculo se logra exactitud y rapidez para la obtención de resultados.

[1] Es recomendable que estos valores no sean menores que los indicados

En los pavimentos de mezclas asfálticas por medio de la fórmula de diseño se obtiene el número estructural (SN) y en función del mismo se determinan los distintos espesores de las capas que conforman el paquete estructural; el diseño esta basado en la identificación del número estructural del pavimento flexible y la cantidad de ejes de carga transitando

i. Determinación del número estructural requerido

En la figura 7-1 se presenta la figura del ábaco por medio del cual se obtiene el número estructural. Las variables para determinar el número estructural de diseño requerido son las siguientes:

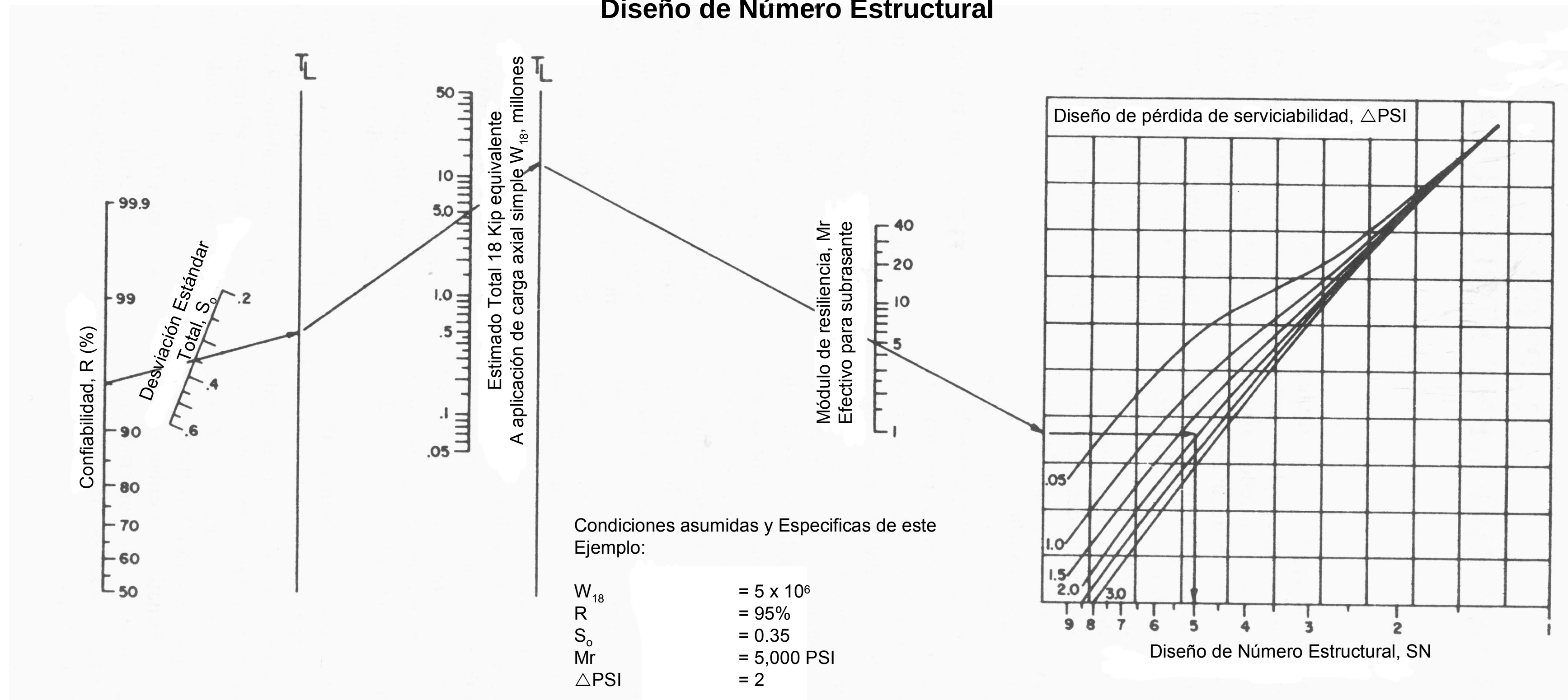
- La cantidad estimada de ejes equivalentes (ESAL´s) por carril, para el período de diseño.
- La confiabilidad (R) como se indica en a) iii.
- El conjunto total de las desviaciones estándar (So) se recomienda utilizar los valores comprendidos dentro de los intervalos siguientes:

Para pavimentos flexibles	0.40 – 0.50
En construcción nueva	0.35 – 0.40
En sobre-capas	0.50

- El módulo de resiliencia efectivo (que tome en cuenta las variaciones a lo largo del año) de la subrasante (Mr).
- La pérdida de serviciabilidad $\triangle PSI = Po - Pt$

A continuación se da un ejemplo, en la cual se aplican determinadas condiciones especificas para el diseño de un pavimento; cuando se tienen ó asumen estos valores, el número estructural obtenido, es aquel que es necesario para las condiciones específicas que conforman un paquete estructural.

Figura 7-1
Diseño de Número Estructural



Solución:

SN = 5.0

Fuente: Guía para diseño de estructuras de pavimentos, AASHTO, 1993

La fórmula general que relaciona el número estructural (SN) con los espesores de capa es la siguiente:

$$SN = a_1 \times D_1 + a_2 \times m_2 \times D_2 + a_3 \times m_3 \times D_3 \qquad (7\text{-}1)$$

En Donde:

- a_1, a_2, a_3 son los coeficientes estructurales ó de capa, de la superficie de rodadura, base y subbase respectivamente.

- m_2, m_3 son los coeficientes de drenaje para base y subbase

- D_1, D_2, D_3 son los espesores de capa en pulgadas para la superficie de rodadura, base y subbase

Esta fórmula tiene muchas soluciones, en función de las diferentes combinaciones de espesores; no obstante, existen normativas que tienden a dar espesores de capas que deben ser construidas y protegidas de deformaciones permanentes, por efecto de las capas superiores de mayor resistencia.

Las normas que se deben considerar son las siguientes:

ii. Estabilidad y factibilidad de la construcción.

En la práctica no deben colocarse capas con espesores menores que los mínimos requeridos, ya que las capas con espesores mayores que el mínimo son más estables. Frecuentemente se especifica un valor mayor en el espesor de capas, con el objeto de mantener la estructura de pavimento en mejores condiciones para absorber los efectos que producen los suelos expansivos.

Cuando se utilicen como capa de rodadura tratamientos superficiales, no se debe considerar aporte estructural de esta capa; pero tiene un gran efecto en la base y la subbase ya que impermeabiliza la superficie y no permite la entrada de agua a la estructura de pavimento.

En la siguiente tabla se dan valores de los espesores mínimos sugeridos para capas asfálticas y base granular en función del tránsito.

Tabla 7-2
Espesores mínimos sugeridos

Número de ESAL´s	Capas Asfálticas	Base Granular
Menos de 50,000	3.0 cm	10 cm
50,000 - 150,000	5.0 cm	10 cm
150,000 - 500,000	6.5 cm	10 cm
500,000 – 2,000,000	7.5 cm	15 cm
2,000,000 – 7,000,000	9.0 cm	15 cm
Más de 7,000,000	10.0 cm	15 cm

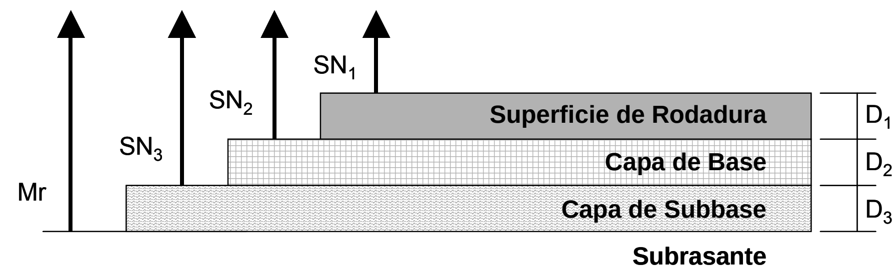
Fuente: Guía para diseño de Estructuras de Pavimentos, AASHTO, 1,993.

Tales mínimos dependen de las prácticas locales y está condicionado el usarlos; diseñadores pueden encontrar necesario modificar hacia arriba los espesores mínimos por su experiencia obtenida; estos valores son sugeridos y se considera su uso tomando en cuenta que son capas asfálticas sobre bases granulares sin tratar.

iii. Espesores mínimos en función del número estructural

El objeto de este concepto, está basado en que las capas granulares no tratadas, deben de estar perfectamente protegidas de presiones verticales excesivas, que lleguen a producir deformaciones permanentes. El proceso se indica en la figura 7-2.

Figura 7-2
Procedimiento para determinar el espesor



Fuente: Guía para diseño de estructuras de pavimentos, AASHTO, 1,993

Para evitar las deformaciones excesivas, los materiales son seleccionados para cada capa así: Superficie de rodadura, base granular y subbase con buen CBR, límites, etc. Para cada uno de los materiales se deben conocer los módulos de resiliencia.

Utilizando el ábaco de la figura 7-1, se pueden encontrar los números estructurales requeridos para proteger cada capa no tratada, reemplazando el módulo de resiliencia de la capa superior por el módulo de resiliencia de la capa que esta inmediatamente abajo; así, para determinar el espesor D1 de la capa asfáltica se supone un Mr igual al de la base y así se obtiene el SN1, que debe ser absorbido por dicha capa. El espesor de D_1 debe ser:

$D > SN_1 / a_1$ (valor mínimo requerido para la capa asfáltica) (7-2)

$D_1^* >= SN_1 / a_1$ (valor real que debe ser usado)

$SN_1^* = a_1 \times D_1^* >= SN_1$

$SN_1^* + SN_2^* >= SN_2$

- a, D, m, y SN están definidos en el texto y son los valores mínimos requeridos.
- El asterisco "*" en D ó SN indica y representa el valor actualmente usado, que debe ser igual ó mayor al valor requerido.

Se adopta un espesor D_1^* ligeramente mayor y el número estructural absorbido por esta capa es:

$$SN_1^* = a_1 \times D_1^* \quad (7\text{-}3)$$

Para determinar el espesor mínimo de la base, se entra al ábaco con el Mr de la subbase y entonces se obtiene el SN_2, a ser absorbido por el concreto asfáltico y la base. Así:

$$D_2^* >= SN_2 – SN_1^* / a_2 \times m_2 \quad (7\text{-}4)$$

Se adopta un espesor ligeramente mayor, D_2^*, y el número estructural absorbido será:

$$SN_2^* = a_2 \times m_2 \times D_2^* \qquad (7\text{-}5)$$

Por último para la subbase, se entra con el Mr correspondiente a la subrasante y se obtiene SN_3 = SN para todo el paquete estructural calculado o sea la capa asfáltica, base y subbase. En este caso el espesor es:

$$D_3^* >= SN_3 - (SN_1^* + SN_2^*) / (a_3 \times m_3) \qquad (7\text{-}6)$$

Se adopta un espesor ligeramente mayor D_3^* y se obtiene el número estructural absorbido por la subbase.

$$SN_3^* = a_3 \times m_3 \times D_3^* \qquad (7\text{-}7)$$

Como verificación tenemos:

$$SN_1^* + SN_2^* + SN_3^* >= SN \qquad (7\text{-}8)$$

Con el resultado que se obtiene en la fórmula (7-8) de que el número estructural total debe ser como mínimo igual ó mayor a la suma de los números estructurales de cada capa, el criterio es que cada capa del paquete estructural queda protegida de los esfuerzos a los cuales va a ser sometida.

Este procedimiento no es aplicable para determinar espesores de capas que estén sobre otras que tengan un módulo de resiliencia mayor de 280 Mpa (40,000 PSI); en estos casos, el espesor de la capa colocada sobre otra que tenga estas características, deberá ser definida por el costo-eficiencia de la misma ó utilizar espesores mínimos desde el punto de vista constructivo; esto quiere decir, que como la capa de abajo tiene un módulo de resiliencia alto, la capa que se coloque encima de ella deberá tener como mínimo un módulo de resiliencia igual ó mayor, y se decidirá si es necesario colocarla ó se utiliza el mínimo especificado.

Como ejemplo, se calculará el paquete estructural con los siguientes valores:

R	=	95 %
So	=	0.35
W18	=	5×10^{6}
Δ PSI	=	2.0

Tabla 7-3
Datos de los materiales para el diseño

Material	Mr (Mpa-psi)	a_i	m_i
Capa asfáltica	2760 (400,000) [2]	0.42	-----
Base	207 (30,000)	0.14	1.30
Subbase	97 (14,000)	0.10	0.70
Subrasante	34 (5,000)	------	------

Fuente: Datos para el desarrollo del ejemplo

De acuerdo a los Módulos de Resiliencia (Mr) se obtienen los números estructurales de diseño (SN), utilizando el ábaco de la figura 7-1, de la siguiente forma:

1) Comenzando en el lado izquierdo del ábaco, en donde dice "Confiabilidad R (%)", se sale con valor de R = 0.95

2) En la siguiente línea inclinada que dice "Desviación Standard S_o" se pone el valor de S_o = 0.35 y uniendo este punto con el de R = 0.95 del punto anterior, se traza una línea que intercepte la siguiente línea T_L en un punto que va a servir de pivote.

3) En la siguiente línea vertical dice " No. Total de ESAL´s aplicados W_{18} (millones)", en esta encontramos el valor de 5×10^{6} ESAL´s = 5,000,000 = 5 en el ábaco; entonces uniendo el punto de pivote de la línea anterior con este nuevo punto, se encuentra otro punto pivote en la siguiente línea vertical T_L.

[2] Módulo de elasticidad del Concreto Asfáltico ó Módulo Dinámico.

4) En la siguiente línea vertical que dice “Módulo Resiliente efectivo de la subrasante (ksi)”, se encuentra el valor de Mr (Mpa-psi) = 5000 = 5 que está en la tabla 7-3 para la subrasante, se une el último punto pivote encontrado anteriormente y el valor de 5 en esta línea hasta encontrar la primera línea vertical izquierda del cuadro situado a la extrema derecha.

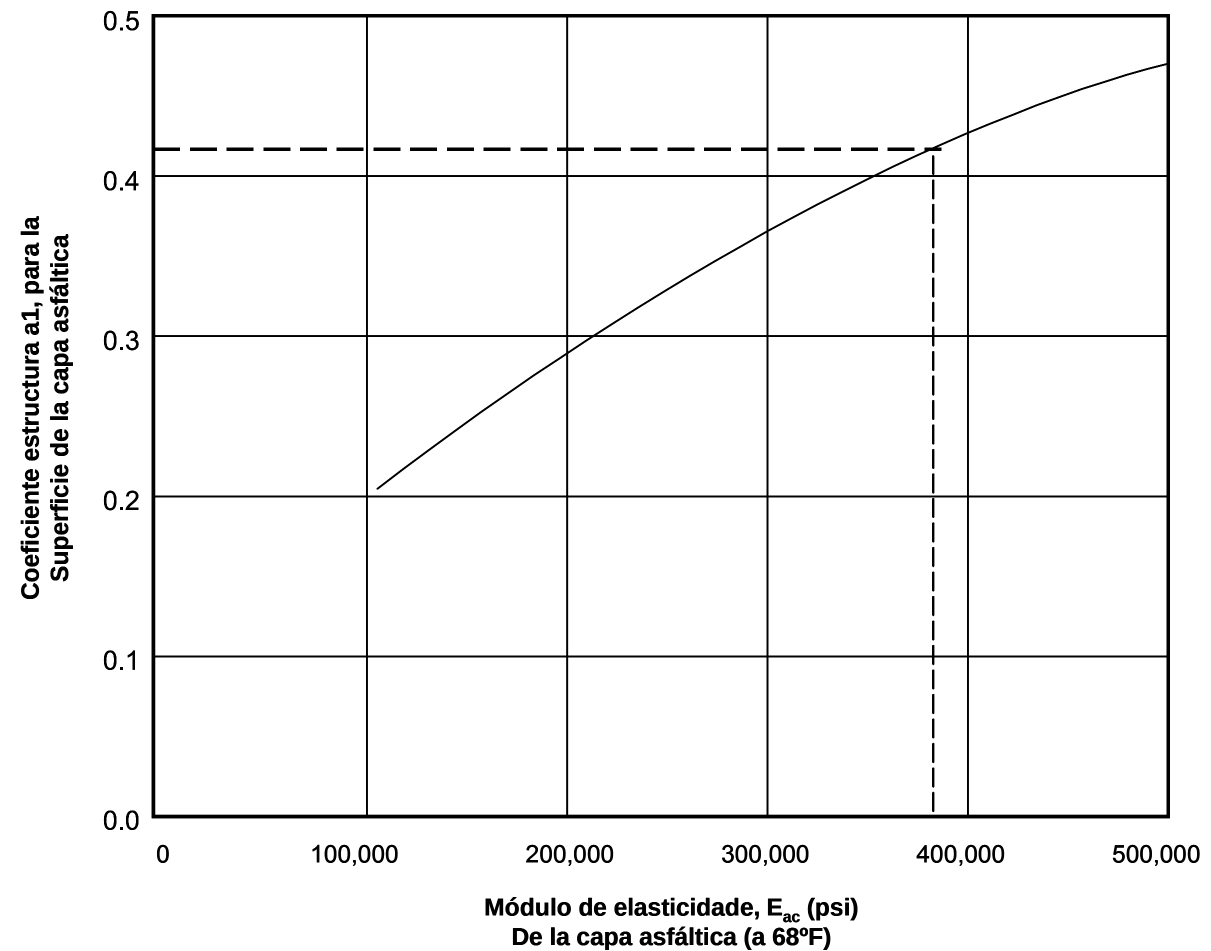
5) De este punto de intersección, se continúa horizontalmente hasta encontrar la línea inclinada que corresponde a un valor de ∆PSI = 2,0 que es “Pérdida de serviciabilidad de diseño ó ∆PSI”, de este punto se baja a la línea inferior del cuadro en donde se encuentra el “Número estructural de diseño SN”, que para el caso es **5.0** (para proteger la subrasante) que es el Número Estructural **requerido** para proteger toda la estructura del pavimento.

6) Para los siguientes valores de Mr = 14,000 = 14 el valor de SN_2 es 3.60 (para proteger la subbase granular) y para Mr = 30,000 = 30 el valor de SN_1 es de 2.65 (para proteger la base triturada).

7) Seguidamente para encontrar los valores de los coeficientes estructurales de capa (a_x), se hace uso de las figuras siguientes en función del módulo elástico del concreto asfáltico y los módulos de resiliencia de la base y la subbase, para lo cual se procede así:

 7.1) Con el valor del módulo elástico del concreto asfáltico (Mpa = 400,000) de la Tabla 7-3, se encuentra el coeficiente estructural de capa a_1 haciendo uso de la figura 7-3; para el caso, saliendo del valor de 400,000 en la figura hacia arriba a interceptar la línea de pivote y de allí horizontalmente hacia la izquierda para encontrar el valor correspondiente de a_1 = 0.42.

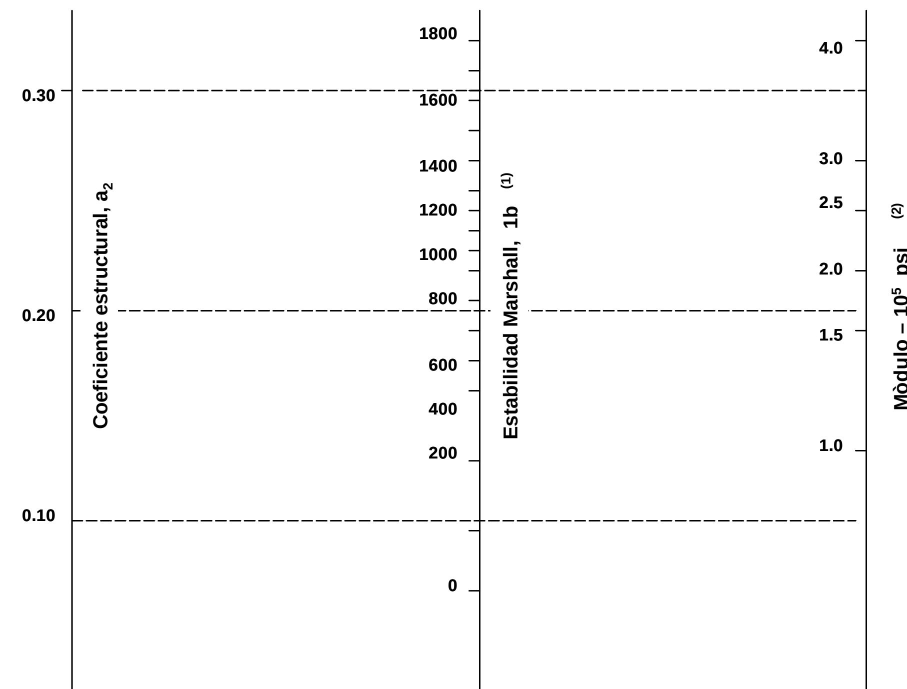
Figura 7-3
Coeficiente estructural a partir del Módulo elástico del concreto asfáltico



Fuente: Guía para diseño de estructuras de pavimentos, AASHTO, 1,993

Cuando no se tenga el valor del módulo de elasticidad del concreto asfáltico, el coeficiente estructural se puede calcular con base en la estabilidad Marshall, según la Figura 7-4.

Figura 7-4
Variación en el coeficiente estructural de la capa de concreto asfáltica

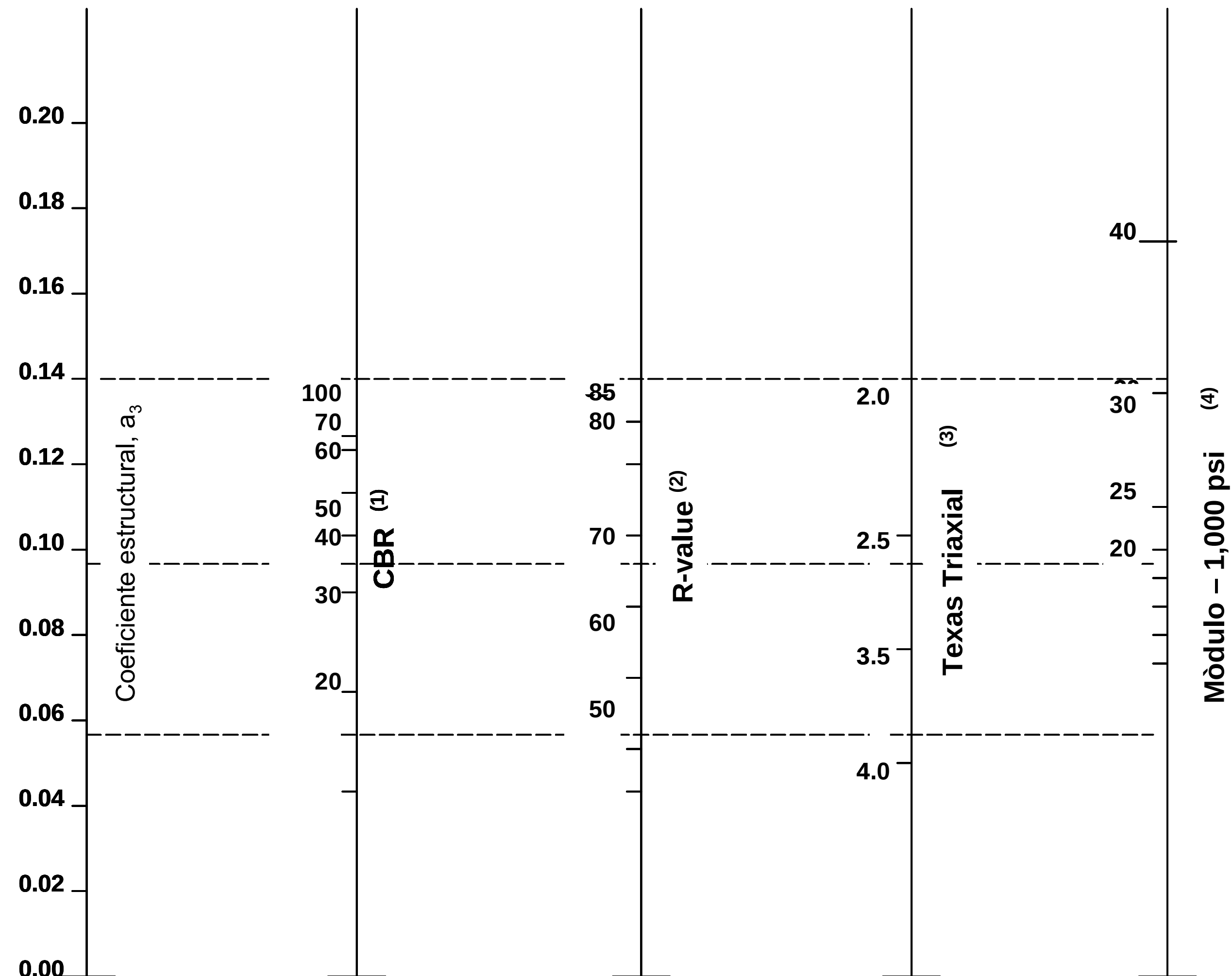


(1) La escala deriva por correlación obtenida de Illinois
(2) La escala derivò en el proyecto NCHRP (3)

Fuente: Guía para diseño de estructuras de pavimentos, AASHTO, 1,993

7.2 Para encontrar el valor de coeficiente de capa a_2 de las bases trituradas ó granulares, se usa la figura 7-5 y con el Módulo de resiliencia Mr = 30,000 ó 30 (PSI) (Tabla 7-3) en la línea vertical del lado extremo derecho, horizontalmente se traza una línea hasta encontrar la línea vertical del extremo izquierdo, lo cual da un valor de a_2 = 0.14

Figura 7-5
Variación en el coeficiente estructural de la capa de base

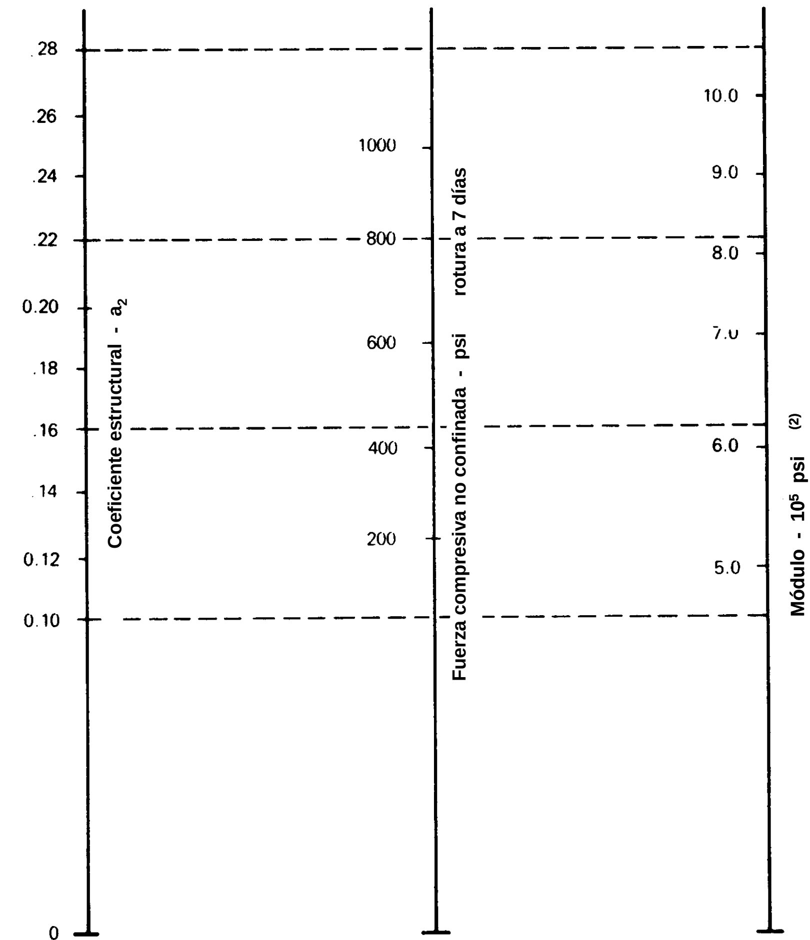


(1) La escala derivò haciendo un promedio de las correlaciones obtenidas de Illinois
(2) La escala derivò haciendo un promedio de las correlaciones obtenidas de California, New Mèxico y Wyoming
(3) La escala derivò haciendo un promedio de las correlaciones obtenidas de Texas
(4) La escala derivò en el proyecto NCHRP (3)

Fuente: Guía para diseño de estructuras de pavimentos, AASHTO, 1,993

Cuando se utilicen bases estabilizadas el coeficiente estructural se calcula conforme la Figura 7-6

Figura 7-6
Variación en el coeficiente estructural de la capa de base estabilizada

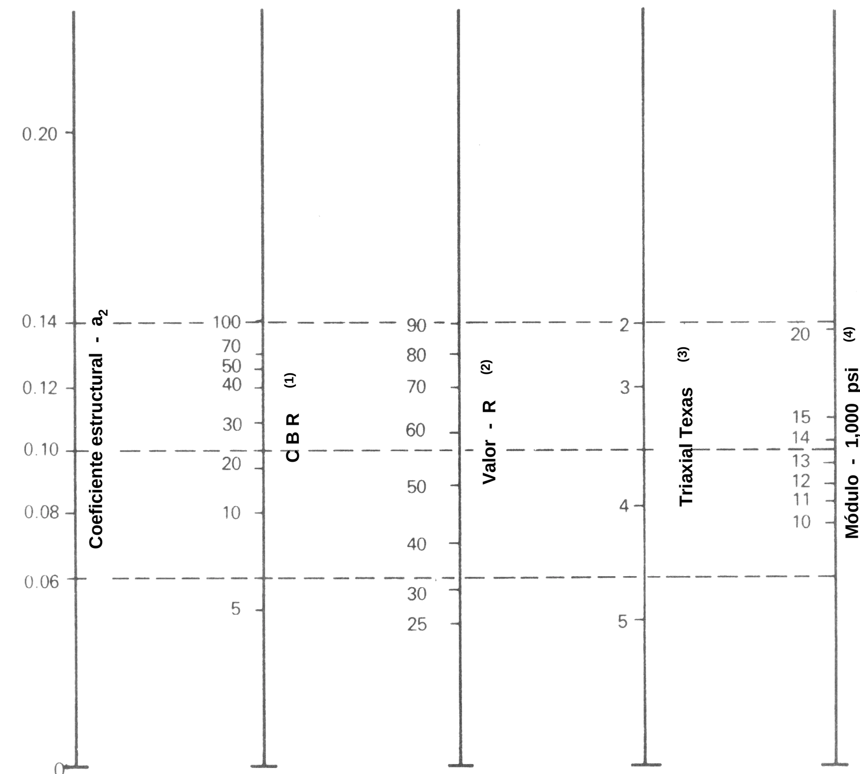


(1) Escala derivada de los porcentajes obtenidos de las correlaciones de Illinois, Louisiana y Texas
(2) Escala derivada del proyecto NCHRP (3)

Fuente: Guía para diseño de estructuras de pavimentos, AASHTO

7.3 Para encontrar el valor del coeficiente de capa a_3 en la subbase, se usa la figura 7-7 y con el Módulo de resiliencia Mr = 14,000 ó 14 (PSI) (Tabla 7-3) en la línea vertical del lado extremo derecho, horizontalmente se traza una línea hasta encontrar la línea vertical del extremo izquierdo, lo cual da un valor de a_3 = 0.10.

Figura 7-7
Variación en el coeficiente estructural de la capa de subbase



(1) Escala derivada de las correlaciones de Illinois
(2) Escala derivada de las correlaciones obtenidas del Instituto del Asfalto, California, New México y Wyoming
(3) Escala derivada de las correlaciones de Texas
(4) Escala derivada del proyecto NCHRP (3)

Fuente: Guía para diseño de estructuras de pavimentos, AASHTO, 1,993

8) Seguidamente, conforme lo estipulado en el capítulo 6.1.5 (método del caudal constante) se calcula el Coeficiente de Drenaje (m_i), que para el caso son los valores que aparecen en la columna de la extrema derecha de la tabla 7-3.

9) Se calcula el espesor de capa asfáltica, suponiendo un Mr igual al de la base; así se calcula el SN_1 que debe ser absorbido por el concreto asfáltico conforme la fórmula 7-2 en función de:

$D_1 >= SN_1 / a_1 = 2.65 / 0.42 = 6.7''$, adoptar 7´´

entonces el SN_1^* absorbido por el Concreto Asfáltico conforme la fórmula 7-6 es:

$$SN_1^* = a_1 \times D_1^* = 0.42 \times 7 = 2.94 \qquad (7\text{-}9)$$

Después se calcula el espesor mínimo de la capa de base, conforme la fórmula 7-7

$$D_2 >= SN_2 - SN_1^* / a_2 m_2$$

$$D_2 >= 3.60 - 2.94 / 0.14 \times 0.80 = 5.9'' \quad \text{adoptar } 6.0''$$

Entonces el SN_2^* absorbido por la base conforme la fórmula 7-8

$$SN_2^* = a_2\ m_2\ D_2^*$$

$$SN_2^* = 0.14 \times 0.80 \times 6.0 = 0.672 \qquad (7.10)$$

Después se calcula el espesor de la subbase, conforme la fórmula 7-6

$$D_3^* >= SN_3 - (SN_1^* + SN_2^*) / a_3 m_3$$

$D_3^* >= 5.0 - (2.94 + 0.672) / 0.10 \times 0.90 = 20.65''$ adoptar 21.0”

Siendo el SN_3^* absorbido por la subbase, conforme la fórmula 7-10

$SN_3^* = a_3 \; m_3 \; D_3^*$

$SN_3^* = 0.10 \times 0.70 \times 21 = 1.47$ (7-11)

Para verificación tenemos la fórmula 5-8, que es la suma de los valores de las fórmulas 7-9, 7-10 y 7-11.

$SN_1^* + SN_2^* + SN_3^* = 2.94 + 0.672 + 1.47 = 5.08 >= 5.0$

Por lo tanto, los espesores de diseño que cumplan con las especificaciones de los materiales son:

Capa asfáltica:	7.0”	(17.78 centímetros)
Base:	6.0”	(15.24 centímetros)
Subbase:	21.0”	(53.34 centímetros)

Si el resultado de la suma de los números estructurales es menor al número estructural requerido, es necesario revisar los espesores asumidos en el inicio, incrementándolos para obtener un número estructural mayor. Se deben considerar otros factores que pueden modificarse para obtener el número estructural requerido (materiales, drenajes, períodos de diseño, etc).

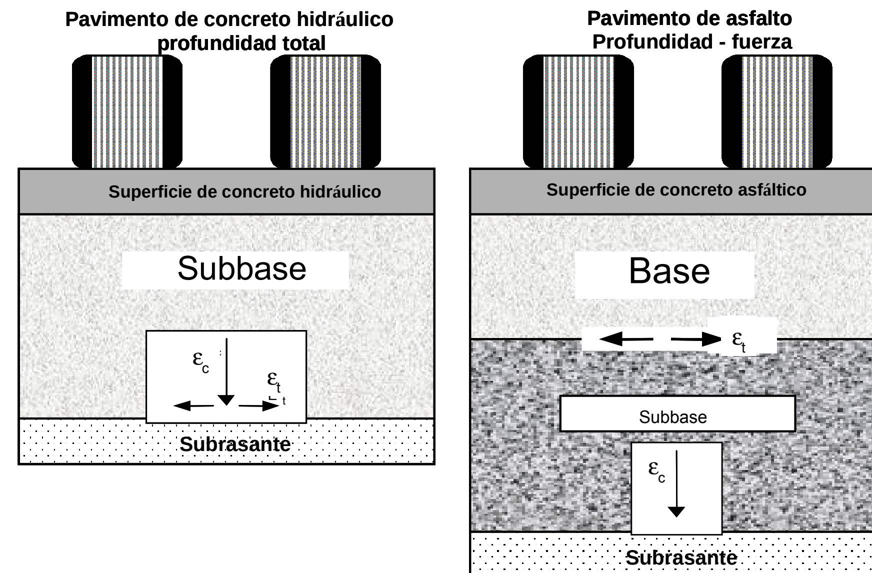
7.1.2 Método del Instituto de Asfalto

En este procedimiento de diseño, la estructura de un pavimento es considerada como un sistema elástico de capas múltiples. El material en cada una de las capas se caracteriza por su módulo de elasticidad.

Este procedimiento es usado para el diseño de pavimentos de asfalto compuesto de combinaciones de capa asfáltica, base y subbase sin ningún tratamiento; la subrasante es la capa subyacente más baja y es asumida infinita en el sentido vertical de arriba hacia abajo y en dirección horizontal; las otras capas de un espesor finito, se asumen infinitas hasta cierto punto en el sentido horizontal. Una continuidad ó fricción total, es asumida en la unión entre cada una de las capas para efectos del diseño.

En la metodología adoptada por este método, las cargas sobre la superficie de pavimento producen dos esfuerzos de tensión que son críticos para propósitos del diseño conforme la figura 7-8; estos son: a) el esfuerzo de tensión horizontal ϵ_t sobre el lado debajo en el límite de la capa asfáltica; y 2) el esfuerzo de compresión vertical ϵ_c en la superficie de la subrasante[3].

Figura 7-8
localización de tensiones consideradas en el procedimiento de diseño



Fuente: Instituto del Asfalto, MS-1, 1,991

Si la fuerza de tensión horizontal ϵ_t es excesiva pueden resultar grietas en la capa; si la fuerza de compresión vertical ϵ_c es excesiva, resultan deformaciones permanentes en la superficie de la estructura de pavimento por las sobrecargas en la subrasante. Excesivas deformaciones en las capas tratadas, pueden ser controladas por las calidades a que están sujetas las propiedades de los materiales.

[3] Nomenclatura según Instituto de Asfalto (MS-1) 1,991

Todos los materiales se caracterizan por el **Módulo de Elasticidad (E_a)** (también llamado **Módulo Dinámico (M_d),** si las mezclas son de asfalto ó **Módulo de Resiliencia (Mr)** si son materiales granulares ó suelos sin tratar) del cual valores específicos son seleccionados basados en la experiencia y estudios con datos de pruebas verdaderas.

El módulo dinámico (M_d), módulo de elasticidad (E_a) de las mezclas asfálticas, es altamente dependiente de la temperatura que se encuentre sobre el pavimento.

Para simular los efectos de la temperatura y sus cambios a través del año, se seleccionaron valores apropiados de módulos dinámicos después de un estudio de la relación módulos-temperatura y las propiedades del asfalto.

El módulo dinámico es función del tiempo de fraguado; períodos de seis meses fueron utilizados para preparar las tablas de diseño; tiempos de fraguado arriba de 24 meses, no tienen significativa influencia sobre el espesor mostrado en las tablas de diseño.

El módulo de resiliencia de los materiales granulares sin tratar, pueden variar con las condiciones de esfuerzo en el pavimento. Valores usados en el desarrollo de las tablas de diseño dadas varían poco, desde 103 Mpa (15,000 psi) hasta más de 345 Mpa (50,000 psi).

En adición a los efectos de cambio mensuales de la temperatura a través del año sobre el módulo dinámico de la capa asfáltica, las curvas de diseño también toman consideraciones sobre el efecto de la temperatura sobre el módulo de resiliencia de la subrasante y los materiales de la base.

a) Estimación del tránsito

En este método se define la diferencia entre "Período de Diseño" y "Período de Análisis", en la siguiente forma: Un pavimento debe ser diseñado para soportar los efectos acumulados del tránsito en cualquier período de tiempo; el período seleccionado, en años, se define como "Período de Diseño", al término de éste, es posible que el

pavimento necesite de una acción de rehabilitación mayor, lo cual debe ser una sobrecarpeta de refuerzo para restaurarlo a su condición original.

La “vida útil de un pavimento” ó “Período de Análisis”, es el tiempo que transcurre entre la construcción del mismo y el momento en que este alcanza las mínimas condiciones de transitabilidad y se puede extender de forma indefinida por medio de la colocación de sobrecarpetas u otras acciones de rehabilitación, hasta que la carretera sea obsoleta debido a cambios significativos como:

- pendientes,
- alineamiento geométrico
- otros factores.

Como los vehículos tipo camión son los que más daño ocasionan en las carreteras, se debe considerar este tipo de flujo vehicular sobre el carril de diseño, por lo que se utilizan los valores dados en la tabla 7-4

Tabla 7-4
Factor de distribución por carril

Número de carriles en ambas direcciones	Porcentaje de camiones en el carril de diseño
2	50
4	45
6 ó más	40

Ref. Guía para diseño de Pavimentos, AASHTO, 1,993

Para efectos de cálculo, en la tabla 7-5 (factor de crecimiento) se consideran períodos de diseño de 1 a 35 años y tasas de crecimiento vehicular desde 2% hasta 10% .

Tabla 7-5
Factor de crecimiento[4]

Período diseño (años)	Tasa de crecimiento anual (porcentaje) r						
	2	4	5	6	7	8	10
1	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
2	2.02	2.04	2.05	2.06	2.07	2.08	2.10
3	3.06	3.12	3.15	3.18	3.21	3.25	3.31
4	4.12	4.25	4.31	4.37	4.44	4.51	4.64
5	5.20	5.42	5.53	5.64	5.75	5.87	6.11
6	6.31	6.63	6.80	6.98	7.15	7.34	7.72
7	7.43	7.90	8.14	8.39	8.65	8.92	9.49
8	8.58	9.21	9.55	9.90	10.26	10.64	11.44
9	9.75	10.58	11.03	11.49	11.98	12.49	13.58
10	10.95	12.01	12.58	13.18	13.82	14.49	15.94
11	12.17	13.49	14.21	14.97	15.78	16.65	18.53
12	13.41	15.03	15.92	16.87	17.89	18.98	21.38
13	14.68	16.63	17.71	18.88	20.14	21.50	24.52
14	15.97	18.29	19.16	21.01	22.55	24.21	27.97
15	17.29	20.02	21.58	23.28	25.13	27.15	31.77
16	18.64	21.82	23.66	25.67	27.89	30.32	35.95
17	20.01	23.70	25.84	28.21	30.84	33.75	40.55
18	21.41	25.65	28.13	30.91	34.00	37.45	45.60
19	22.84	27.67	30.54	33.76	37.38	41.45	51.16
20	24.30	29.78	33.06	36.79	41.00	45.76	57.28
25	32.03	41.65	47.73	54.86	63.25	73.11	98.35
30	40.57	56.08	66.44	79.06	94.46	113.28	164.49
35	49.99	73.65	90.32	111.43	138.24	172.32	271.02

FUENTE: Instituto del Asfalto (MS-1) 1,991

Para el cálculo de los ejes equivalentes, se utiliza el ejemplo indicado en la Hoja de Trabajo HT-01:

[4] Factor = $\frac{(1 + r)^n}{r}$, donde r = $\frac{\%}{100}$ no igual a 0. Si el crecimiento anual es igual a 0, el factor de crecimiento = período de diseño

Hoja de trabajo HT - 01
cálculo del equivalente de 18 Kips en carga de ejes simples

Proyecto ________________ Período de diseño 15

Espesor de la losa: 10 cm Presión de contacto: 100 psi

Método del Instituto de Asfalto

Tipo de Vehículo	Cantidad de Vehículos diarios **"A"**	Factor de crecimiento **"B"**	Tránsito de diseño **"C"**	ESAL´s Factor **"D"**	ESAL´s de diseño **"E"**
Vehículos sencillos		**4%**			
Autos	500	20.02	3,653,650	0.0002	73
Autobuses	125	20.02	913,413	1.159770	1,459,359
Camiones eje simple		**2%**			
Pick-ups	250	17.29	1,577,713	0.03448	631
Otros Vehículos 2 ejes y cuatro ruedas (agrícolas)	25	17.29	157,771	1.59770	252,071
Camiones de 2 ejes, 6 ruedas, camiones de 3 ejes o más	80	17.29	504,868	1.18270	597,107
Camiones tipo trailer eje compuesto		**6%**			
Semiremolque (3 ejes)	450	21.58	3,823,740	0.94770	3,623,758
Semiremolque (4 ejes)	45	21.58	382,374	2.80170	1,071,297
Semiremolque (5 ó más ejes)	25	21.58	212,430	2.28870	486,189
		2%			
Camión acoplado (5 ejes)	10	17.29	63,109	2.80170	176,811
Camión acoplado (6 ó más ejes)	5	17.29	31,554	2.65870	83,893
TOTAL VEHICULOS	**1,515**		**ESAL´s de diseño**		**7,804,959**

Factor de Dirección: 0.5
Factor por presión de llanta: 1.8
ESAL´s por carril de tránsito: 0.5 x 1.8 x 7,804,959 = 7,024,463

En la hoja de trabajo HT-01 los factores de equivalencia de carga ó coeficientes de daño (columna D) para ejes sencillos, dobles ó triples, se toman de la Tabla 7-6; la cual incluye cargas sobre el eje, considerando desde 1000 lbs (0.5 toneladas métricas) hasta 90,000 lbs (41,000 toneladas métricas), este rango de pesos por eje cubre en forma extensa, cualquier condición de peso de vehículos de carga en cualquier red de carreteras, desde rurales hasta autopistas.

Tabla 7.6
Factores de equivalencia de cargas

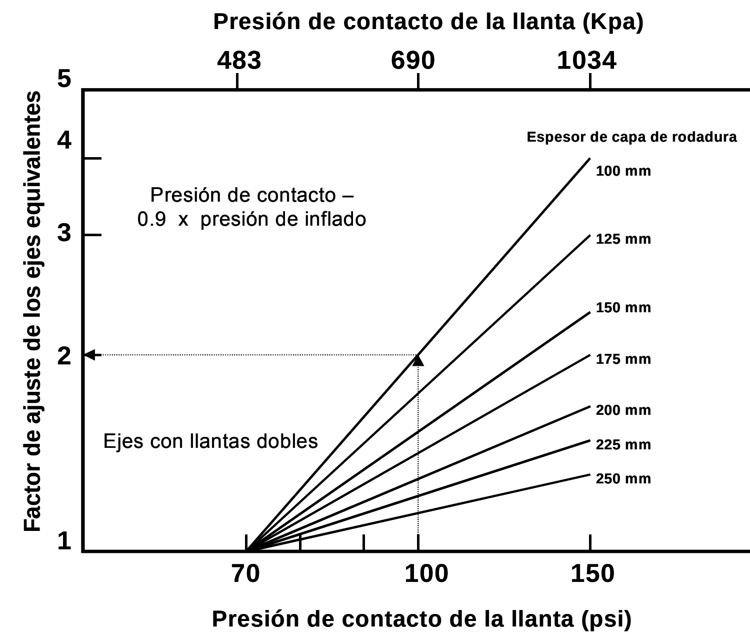
Cargas por eje		Factores equivalentes de carga		
kN	**Lbs**	**Eje simple**	**Eje tándem**	**Eje tridem**
4.45	1,000	0.00002		
8.9	2,000	0.00018		
17.8	4,000	0.00209	0.0003	
26.7	6,000	0.01043	0.001	0.0003
35.6	8,000	0.0343	0.003	0.001
44.5	10,000	0.0877	0.007	0.002
53.4	12,000	0.189	0.014	0.003
62.3	14,000	0.360	0.027	0.006
71.2	16,000	0.623	0.047	0.011
80.0	18,000	1.000	0.077	0.017
89.0	20,000	1.51	0.121	0.027
97.9	22,000	2.18	0.180	0.040
106.8	24,000	3.03	0.260	0.057
115.6	26,000	4.09	0.364	0.080
124.5	28,000	5.39	0.495	0.109
133.4	30,000	6.97	0.658	0.145
142.3	32,000	8.88	0.857	0.191
151.2	34,000	11.18	1.095	0.246
160.1	36,000	13.93	1.38	0.313
169.0	38,000	17.20	1.70	0.393
178.0	40,000	21.08	2.08	0.487
187.0	42,000	25.64	2.51	0.597
195.7	44,000	31.00	3.00	0.723
204.5	46,000	37.24	3.55	0.868
213.5	48,000	44.50	4.17	1.033
222.4	50,000	52.88	4.86	1.22
231.3	52,000		5.63	1.43
240.2	54,000		6.47	1.66
249.0	56,000		7.41	1.91
258.0	58,000		8.45	2.20
267.0	60,000		9.59	2.51
275.8	62,000		10.84	2.85
284.5	64,000		12.22	3.22
293.5	66,000		13.73	3.62
302.5	68,000		15.38	4.05
311.5	70,000		17.19	4.52
320.0	72,000		19.16	5.03
329.0	74,000		21.32	5.57
338.0	76,000		23.66	6.15
347.0	78,000		26.22	6.78
356.0	80,000		29.0	7.45
364.7	82,000		32.0	8.2
373.6	84,000		35.3	8.9
382.5	86,000		38.8	9.8
391.4	88,000		42.6	10.6

FUENTE: Instituto del Asfalto (MS-1) 1,991

Como una innovación a las versiones anteriores de diseño, el método incorpora factores de ajuste de los ejes equivalentes de diseño (ESAL´s) para diferentes presiones de contacto de las llantas sobre el pavimento, en función de la presión de inflado (presión de inflado = a presión de contacto / 0.90) y los espesores de la capa asfáltica; en la figura 7-9 se consideran espesores de carpeta asfáltica desde 10 cm hasta 25 cm.

Este factor de ajuste de los ejes equivalentes, en función de la correlación entre presión de contacto de las llantas y el espesor de la capa de rodadura, es un dato que añade una característica especial al diseño bajo este método, ya que caracteriza la importancia que tiene la presión de inflado sobre el espesor de una estructura de pavimento, ya que a mayor presión de inflado y menor espesor de capa de rodadura, incrementa en buena medida el número de ejes equivalentes y por lo tanto mayor daño a una estructura determinada.

Figura 7-9
Factor de ajuste de los ejes equivalentes por presión de llantas



FUENTE: Instituto del Asfalto (MS-1) 1,991

Para el uso de la hoja de trabajo HT-01, se procede de la siguiente manera:

1) En la columna "A" se coloca la cantidad de vehículos diarios que corresponden a cada tipo de vehículo; valor tomado de un aforo anteriormente efectuado.

2) En la columna "B" se coloca el factor de crecimiento de vehículos en función de la tasa (%) anual de crecimiento considerada y el período de diseño en años asumido (15 años). Tabla 7-5.

3) En la columna "C" se coloca el producto de las columnas "A" por "B" y por 365 (para llevar el valor a forma anual).

4) En la columna "D" se coloca el factor de equivalencia de carga ó coeficiente de daño, sacado de la tabla 7-6 en función de la carga total por eje ó conjunto de ejes, si estos son sencillos, dobles ó triples.

5) En la columna "E" se coloca el producto de las columnas "C" y "D" que son los ESAL´s de diseño para cada tipo de vehículo considerado en la hoja de trabajo.

6) La **suma** de la columna "E", da el valor total de los ESAL´s calculados para el período de diseño considerado.

7) Posteriormente, este valor de ESAL´s debe afectarse por el **porcentaje de camiones en el carril de diseño dado en la tabla 7-4**

8) También debe de afectarse el valor de los ESAL´s por el factor de ajuste por presión de llantas determinado por la Figura 7-9.

b) Materiales

En el diseño de espesores de una estructura de pavimento flexible, el método del Instituto de Asfalto, considera como parámetro fundamental la evaluación de los materiales para obtener el Módulo de resiliencia (Mr).

Como no es fácil tener el equipo adecuado para llevar a cabo este tipo de pruebas, se han establecido factores de correlación entre el Módulo de resiliencia (Mr) y la prueba del CBR (AASHTO T-193); los valores obtenidos son bastante aproximados, sin embargo, para obtener resultados más precisos es necesario llevar a cabo la prueba del Módulo de Resiliencia (Mr) de la Subrasante.

Para calcular el módulo de resiliencia a partir del CBR se han desarrollado las siguientes fórmulas empíricas:

$$Mr\ (Mpa) = 10.3 \times CBR$$

$$Mr\ (psi) = 1{,}500 \times CBR$$

También pueden utilizarse las correlaciones indicadas en el apartado e.1 del capítulo 4.

Es muy importante hacer notar que tales correlaciones solo son aplicables a materiales de la capa de subrasante, ya que no se usan para materiales granulares que se consideren emplear en las capas de base y subbase.

Es necesario para aplicar la metodología descrita, que se incluyan métodos de prueba normados por AASHTO y ASTM, los cuales deben de considerar los parámetros indicados en la Tabla 7-7.

En función del tránsito esperado sobre el pavimento en estudio, el método del Instituto de Asfalto recomienda los siguientes valores percentiles para calcular el Módulo de Resiliencia de diseño de la capa de subrasante, mostrados en la Tabla 7-8.

Tabla 7-7
Normas AASHTO y ASTM

Prueba	Uso	AASHTO	ASTM
Límite líquido	Clasificación	T-89	D-4318
Límite plástico	Clasificación	T-90	D-4318
Granulometría	Clasificación	T-88	D-422
Compactación	Relación humedad – densidad	T-180	D-1557
CBR	Básico para diseño de espesores	T-193	D-1883
Valor R	Básico para diseño de espesores	T-190	D-2844
Equivalente de arena	Clasificación	T-176	C-293-79
Pasa tamiz No. 200	Clasificación	T-11 y T-27	C-117-89 y C-136-84
Módulo de resiliencia (Mr)	básico para diseño de espesores	Se utiliza el método MS-1 del propio Instituto de Asfalto.	

Fuente: Generada por el Consultor.

Tabla 7-8
Valor percentil por nivel de tránsito

Nivel de tránsito	Valor percentil para diseño de subrasante
< de 10,000 ESAL´s	60
Entre 10,000 y 1,000,000 ESAL´s	75
> de 1,000,000 ESAL´s	87.5

Fuente: Instituto de Asfalto, (MS-1) 1,991

Con los valores obtenidos en el laboratorio, del Módulo de Resiliencia, de las muestras del campo, se deberá calcular el Mr de diseño de la capa de la subrasante con los percentiles de la tabla anterior.

Para que el diseño de los espesores de una estructura de pavimento llene su cometido, es necesario que los requerimientos de compactación de las capas de base y subbase, cumplan con las siguientes recomendaciones: Las capas de base y subbase que son formadas por materiales granulares sin ningún tratamiento, (no estabilizadas), se deben compactar con un contenido de humedad + ó – 1.5 % de la humedad óptima, para alcanzar la densidad mínima del 100% de la densidad seca máxima de laboratorio; para el efecto se recomiendan los siguientes valores para las diferentes pruebas a realizarse con materiales de subbase y base:

Es importante señalar que también el método incluye factores de medio ambiente y diferentes clases de tipos de asfalto; para el caso se consideran tres diferentes temperaturas dependiendo de la región ó zona en donde se pretenda construir el pavimento, climas fríos (7° C), templados (15.5° C) y cálidas (24° C) en los cuales se utilizan cementos asfálticos desde el AC-5 hasta el AC-40, por lo que se recomienda la clasificación siguiente:

Tabla 7-9
Grados de asfalto de acuerdo al tipo de clima

Clima	Temperatura media anual del aire (TMAA)	Grado de asfalto
Frío	Menor o igual a 7º C	AC-5, AC-10
Templado	Entre 7º y 24º C	AC-10, AC-20
Cálido	Mayor de 24º C	AC-20, AC-40

Fuente: Instituto del Asfalto (MS-1) 1,991

Para espesores mínimos en función de la cantidad de tránsito de ejes equivalentes, este método recomienda los siguientes valores para superficies de rodadura construidas sobre bases granulares normales sin ningún proceso de estabilización.

Tabla 7-10
Espesores mínimos de capas asfálticas sobre bases

Cantidad de ejes equivalentes	Condición del tránsito	Espesores mínimos de la capa asfáltica, en cm
Hasta 10,000	Ligero	7.5
Entre 10,000 y 1,000,000	Mediano	10.0
Mayor de 1,000,000	Pesado	12.5 o más

Fuente: Instituto de Asfalto (MS-1) 1,991

c) Espesores de Diseño

Este método del Instituto de Asfalto, proporciona para el diseño final de los espesores de una estructura de pavimento, 9 Figuras de diseño de la 7-10 a la 7-18 en sistema métrico, decimal y 9 Figuras de diseño de la 7-19 a la 7-27 en sistema inglés, las cuales cubren todas las variables que se puedan involucrar en el diseño y que fueron analizadas en párrafos anteriores.
Las figuras se presentan en escalas logarítmicas para los siguientes parámetros:

1) Las tres condiciones climáticas consideradas en la Temperatura Media Anual del Aire (TMAA) de la tabla 7-9.

2) Total de ejes equivalentes acumulados durante el período de diseño, Hoja de Trabajo HT-01

3) Módulo de Resiliencia de la subrasante.

4) Capa de Concreto Asfáltico de una sola capa ó espesor total.

5) Para cuando se tiene una capa de base sin estabilizar de 15 cm (6”)

6) Para cuando se tiene una capa de base sin estabilizar de 30 cm (12”)

Como ejemplo de diseño de una estructura de pavimento conforme lo analizado en párrafos anteriores, se desarrolla el siguiente:

DATOS:

CBR de la subrasante: (Resultado de pruebas de Laboratorio)	3.5
Ejes equivalentes calculados en la hoja de trabajo HT-01	7,024,463
Capa de Base:	30 cm
Temperatura Media Anual del Aire (TMAA):	24° C

1) Se calcula el Módulo de Resiliencia de la subrasante conforme la fórmula

   Mr (Mpa) = 10.3 x CBR = 10.3 x 3.5 = 36.05

   Mr (Mpa) = 36.05

2) En la Figura 7-18 del Instituto de Asfalto que corresponde a una Temperatura Media Anual del Aire (TMAA) de 24° C y Base sin tratamiento de 30 cm. Se parte del eje horizontal en donde están las Carga de Eje Equivalente Simple de 7,024,463 = 7 x 10^6 y de la vertical con el Módulo de Resiliencia (Mr) de la Subrasante en Mpa = 36.05 las dos líneas se interceptan en 175 milímetros y en la Figura 7-27, 8.8"

3) Con los datos se llega a que el espesor de capa Asfáltica es de 175 milímetros (8.8") con una base de 30 centímetros de espesor.

4) Con los mismos datos pero colocando una sola capa (Full Depth) la Figural 7-10 y 7-25 se tiene siguiendo el mismo procedimiento lo siguiente: 210 milímetros u 11.6".

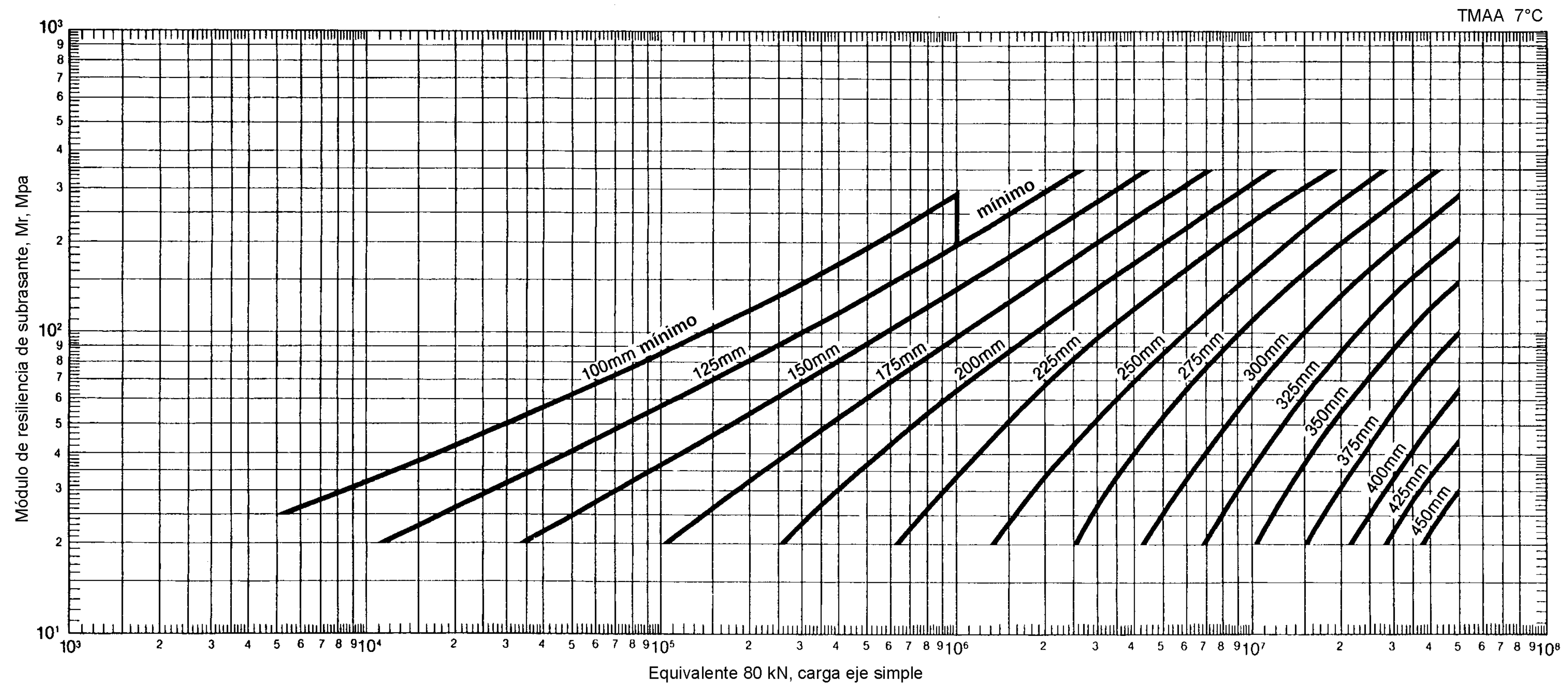


Figura 7-10
Espesor completo de concreto asfáltico

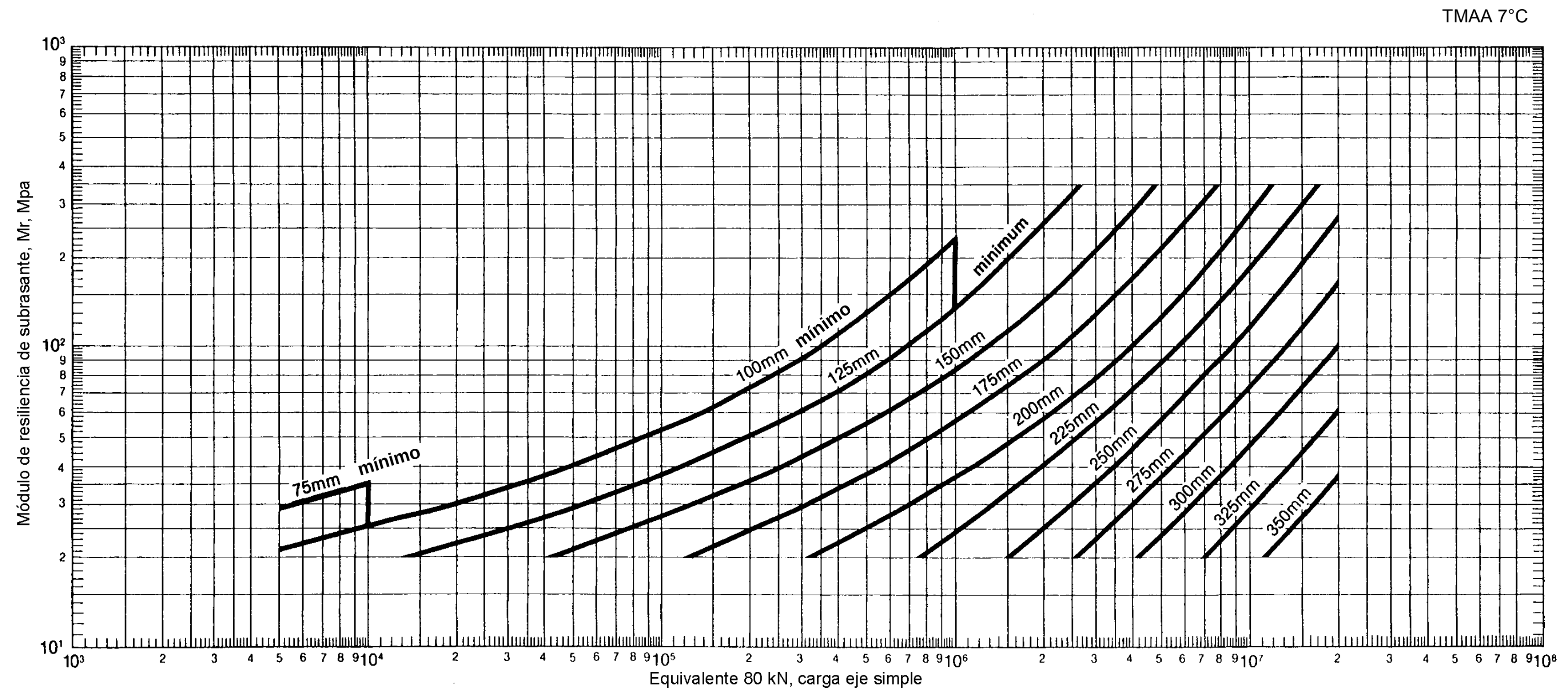


Figura 7-11
Agregado de base de 150 milímetros de espesor

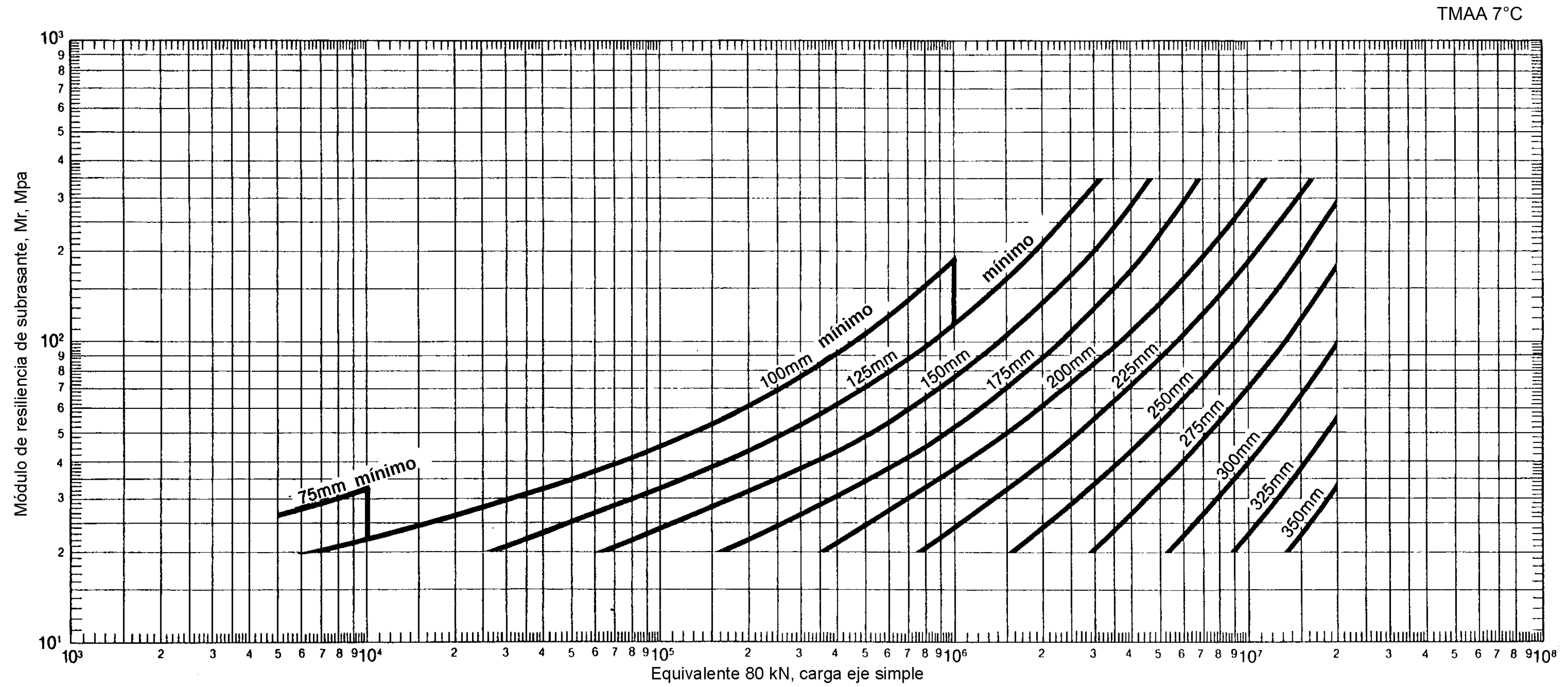


Figura 7-12
Agregado de base de 300 milímetros de espesor

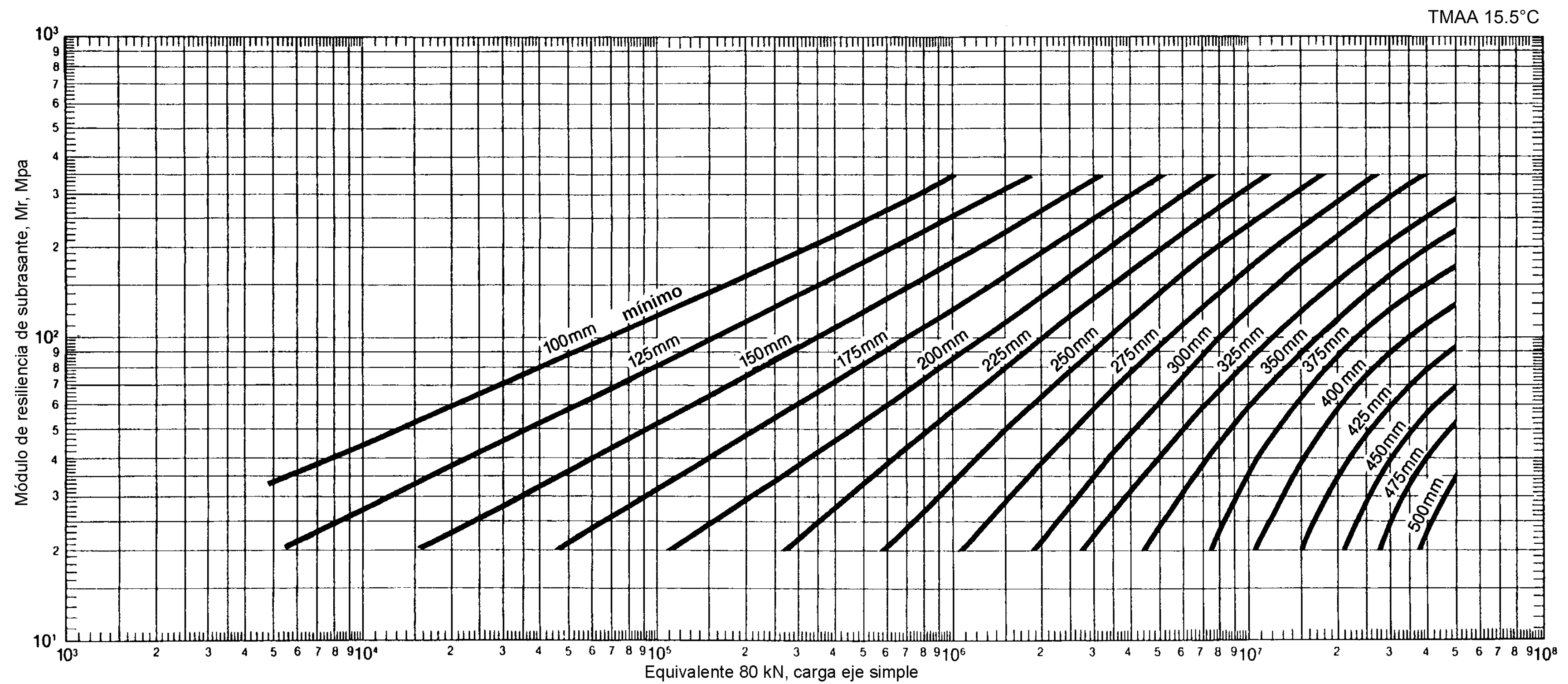


Figura 7-13
Espesor completo de concreto asfáltico

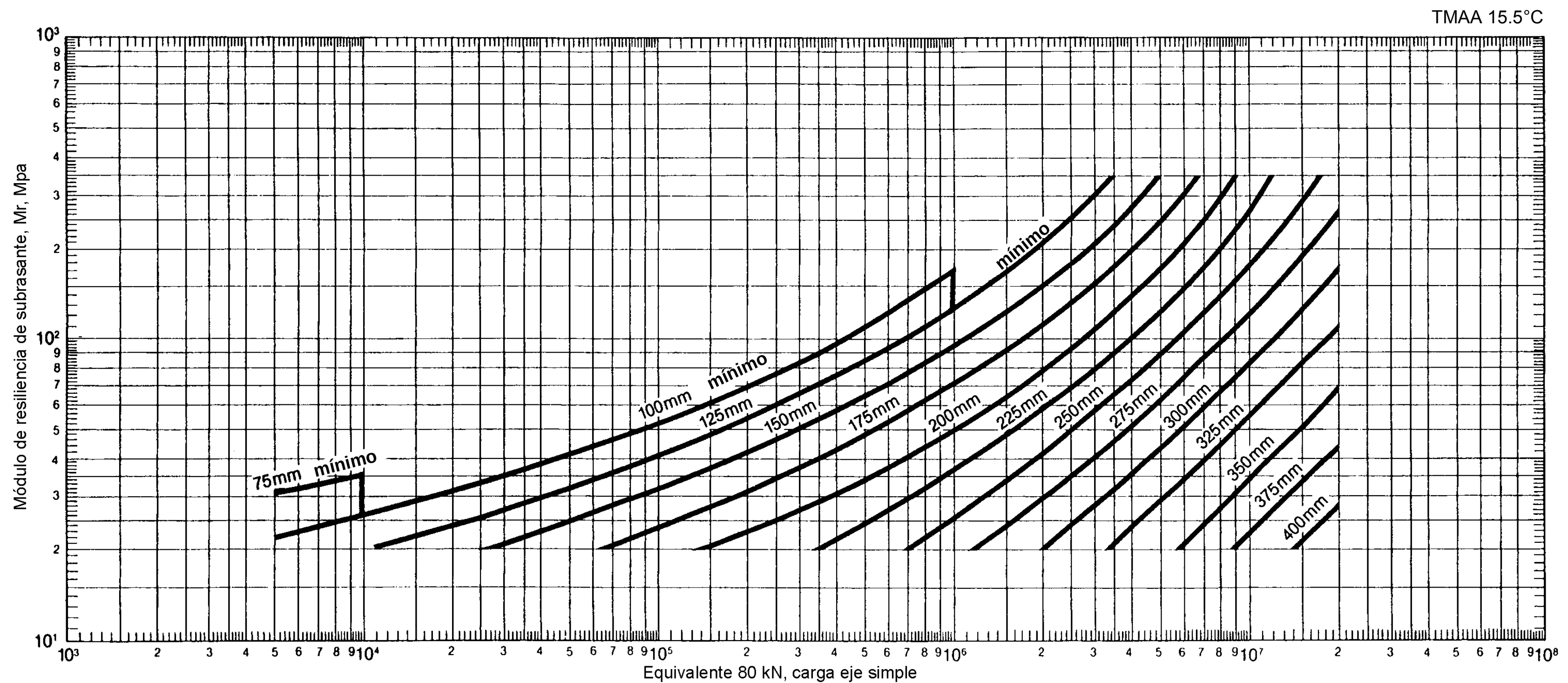


Figura 7-14
Agregado de base de 150 milímetros de espesor

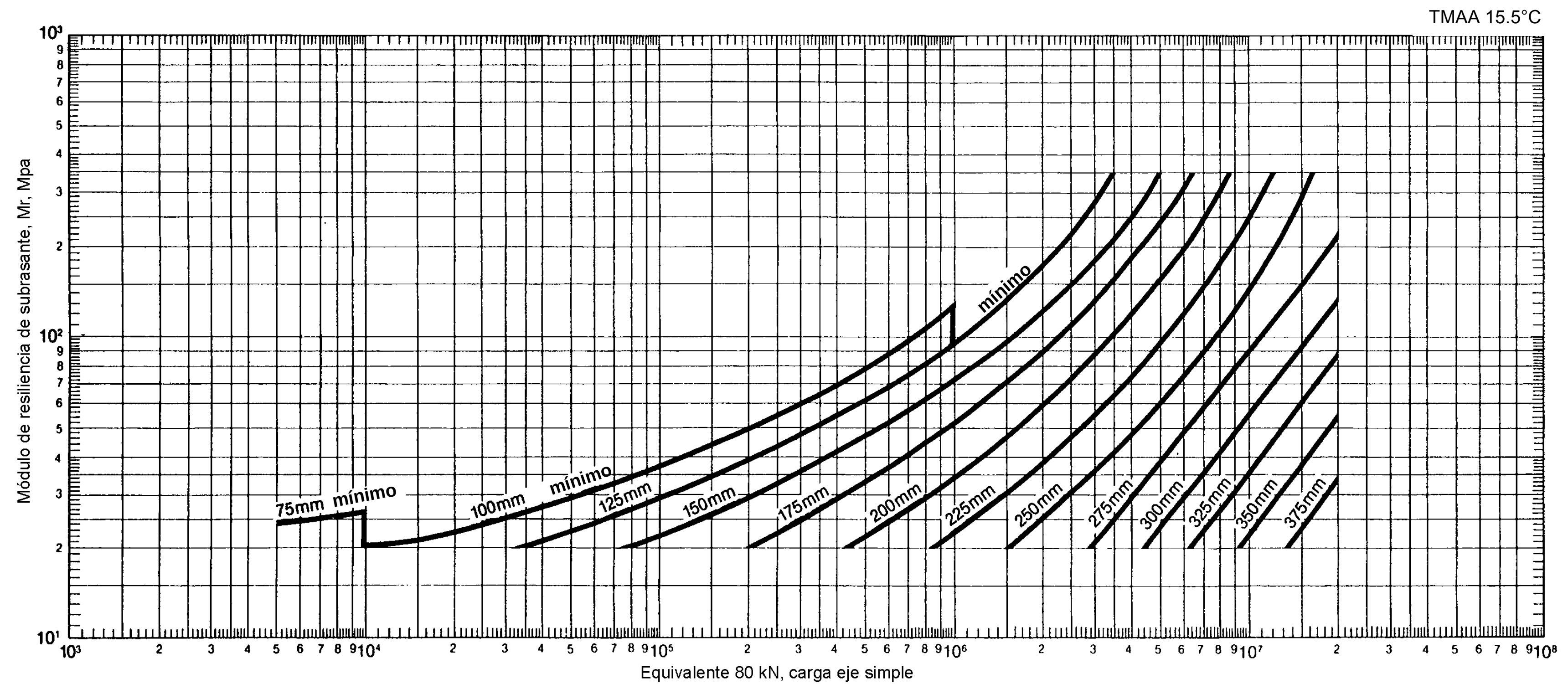


Figura 7-15
Agregado de base de 300 milímetros de espesor

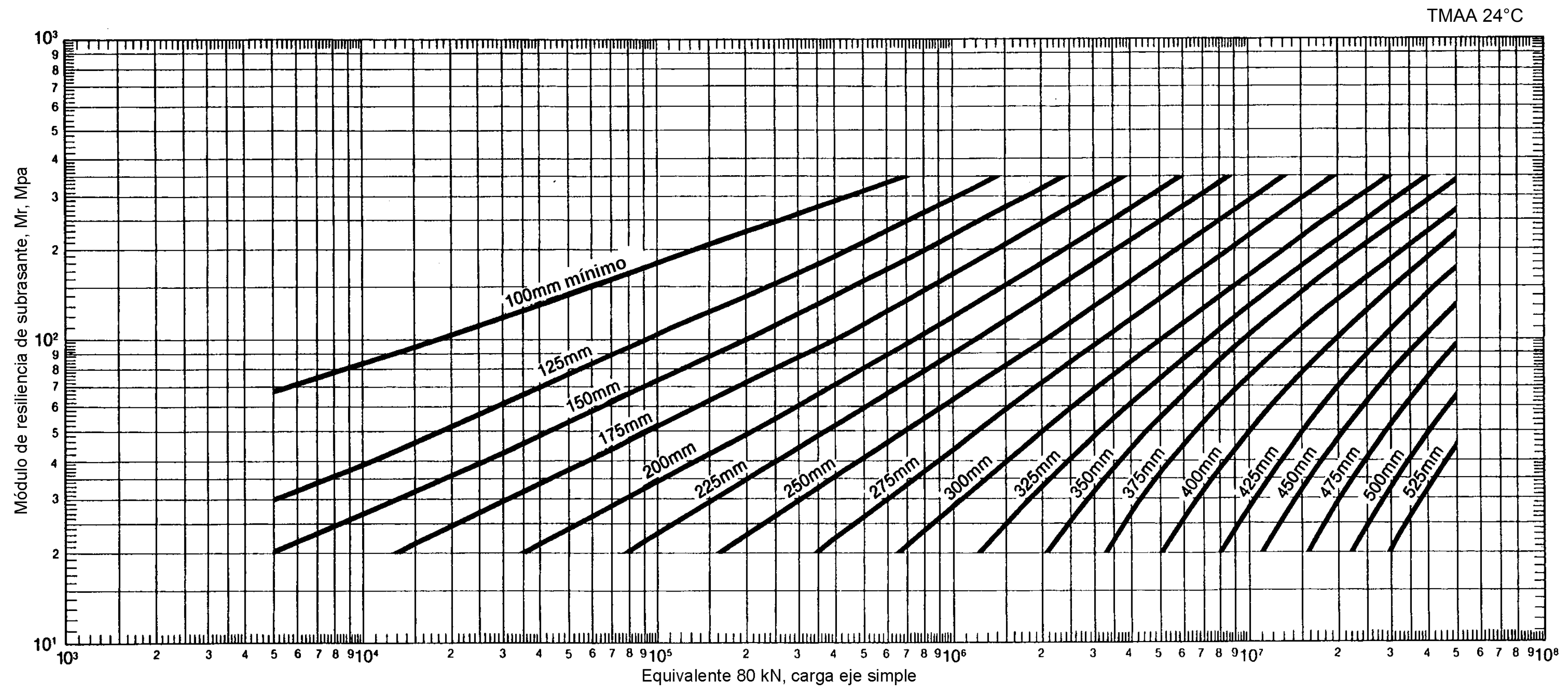


Figura 7-16
Espesor completo de concreto asfáltico

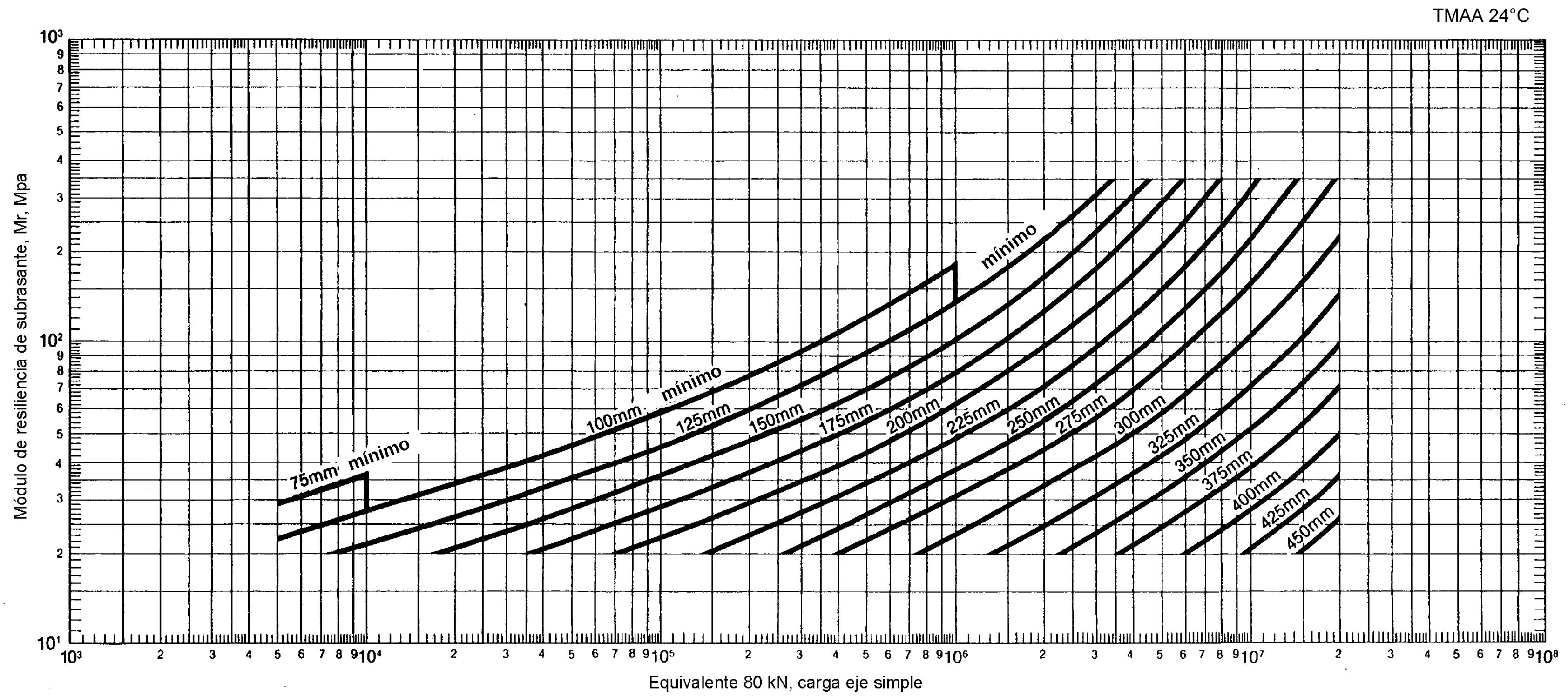


Figura 7-17
Agregado de base de 150 milímetros de espesor

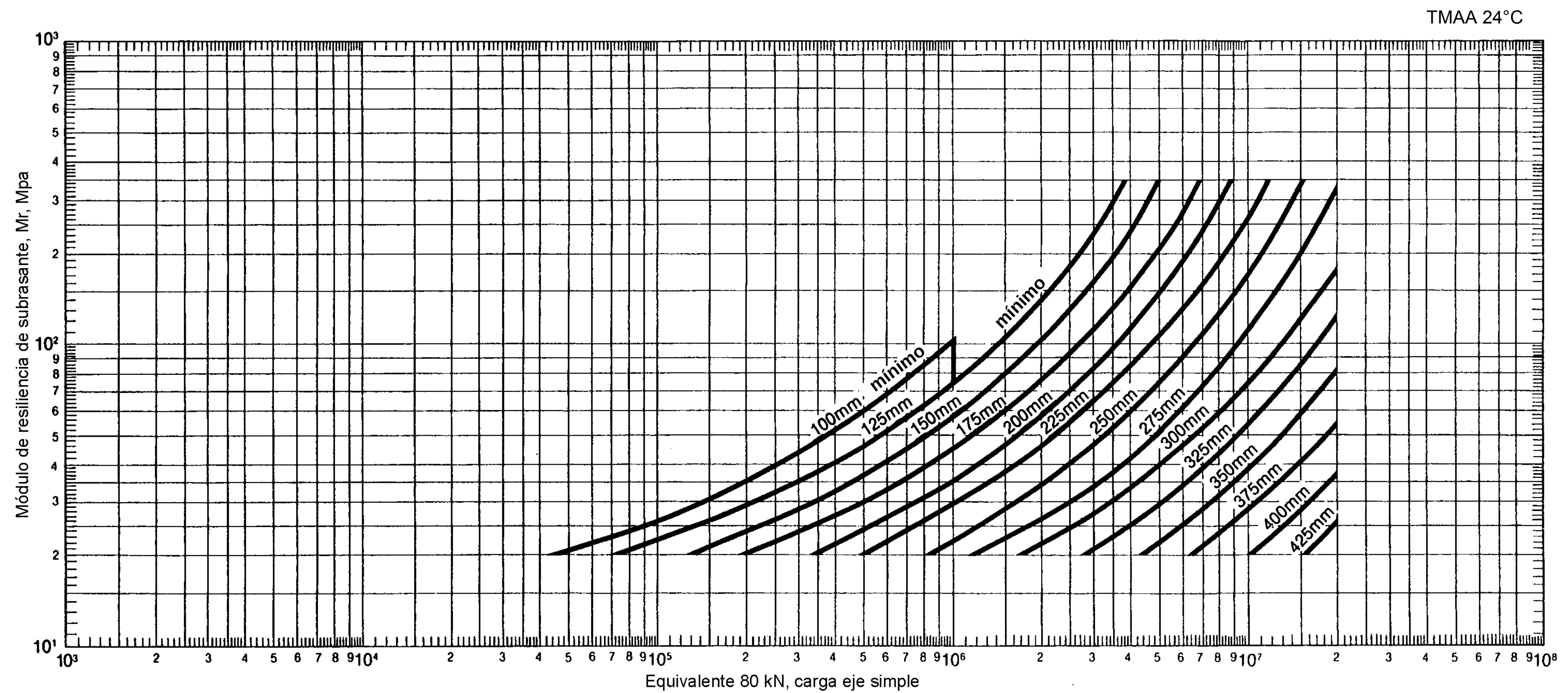


Figura 7-18
Agregado de base de 300 milímetros de espesor

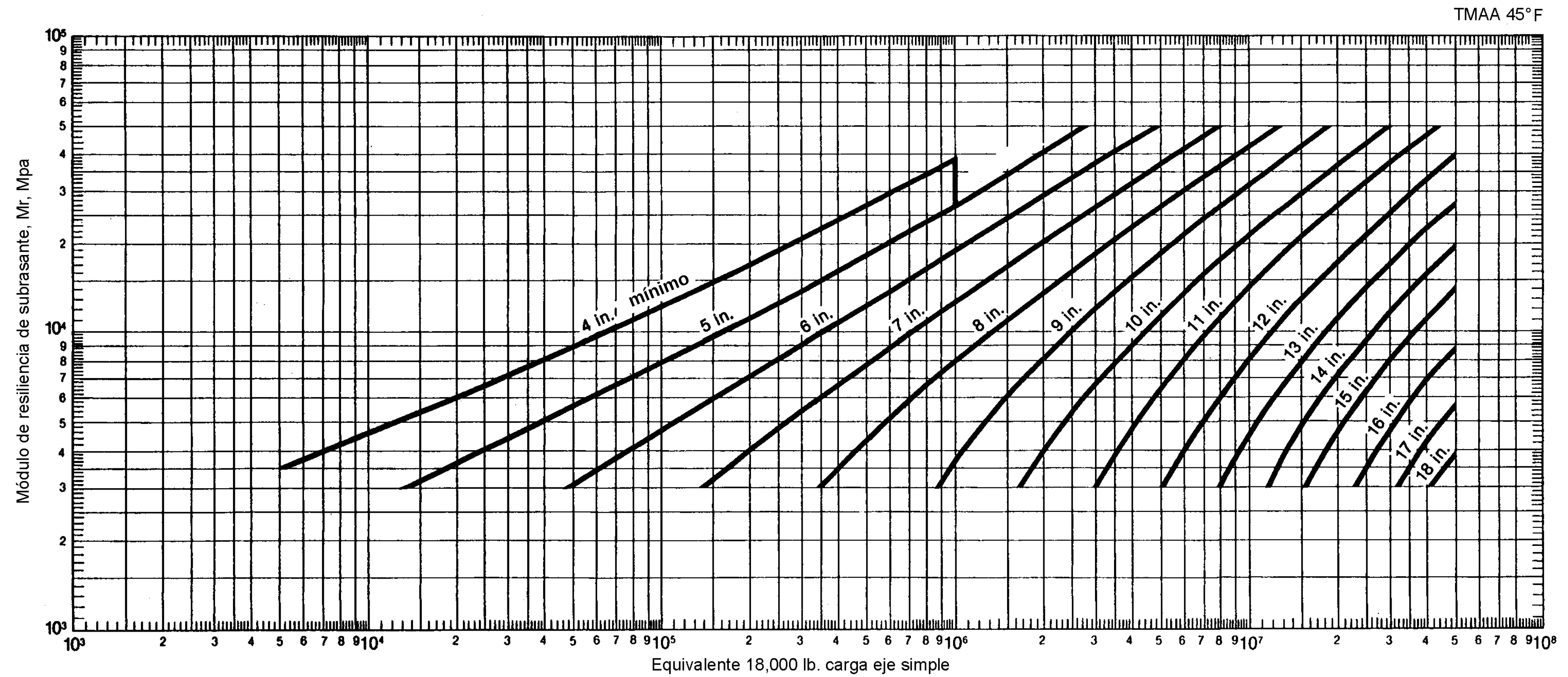


Figura 7-19
Espesor completo del concreto asfáltico

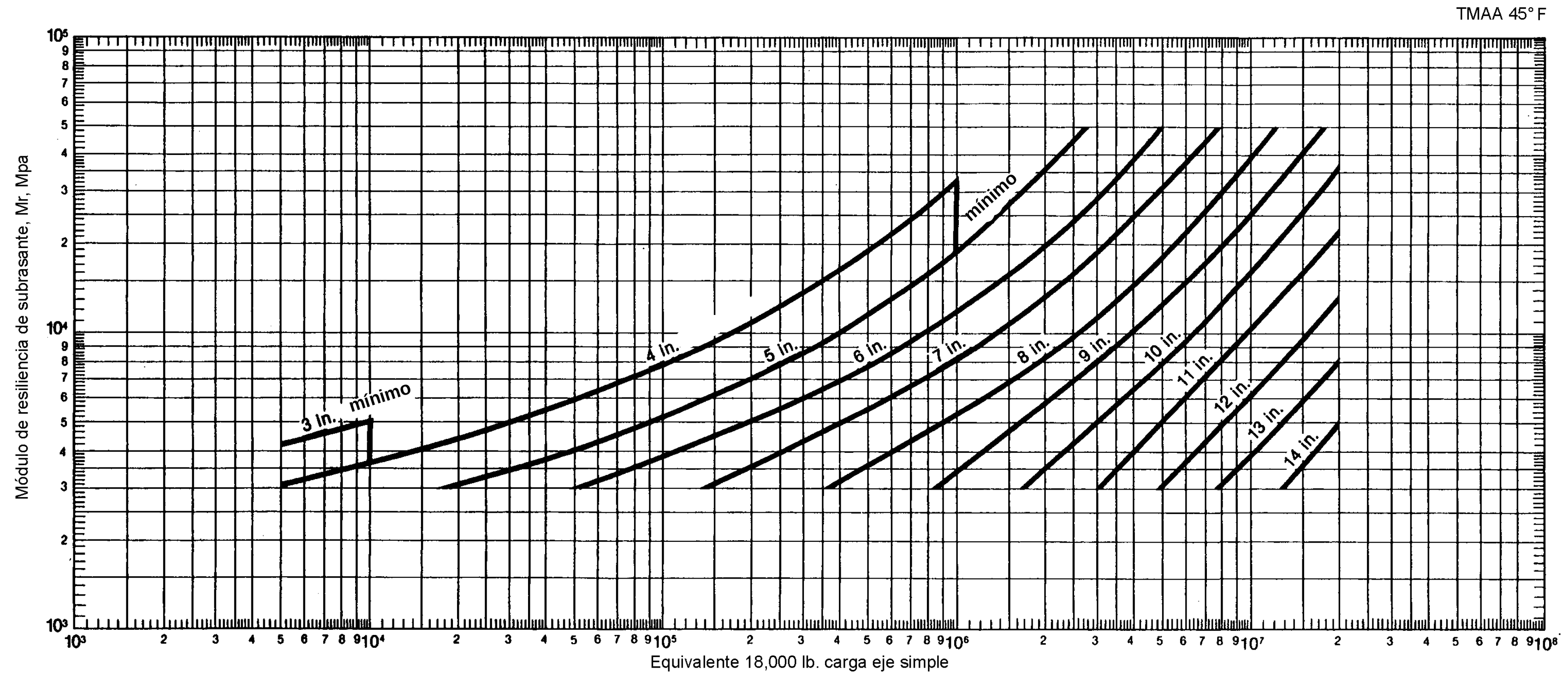


Figura 7-20
Agregado de base de 6 pulgadas de espesor

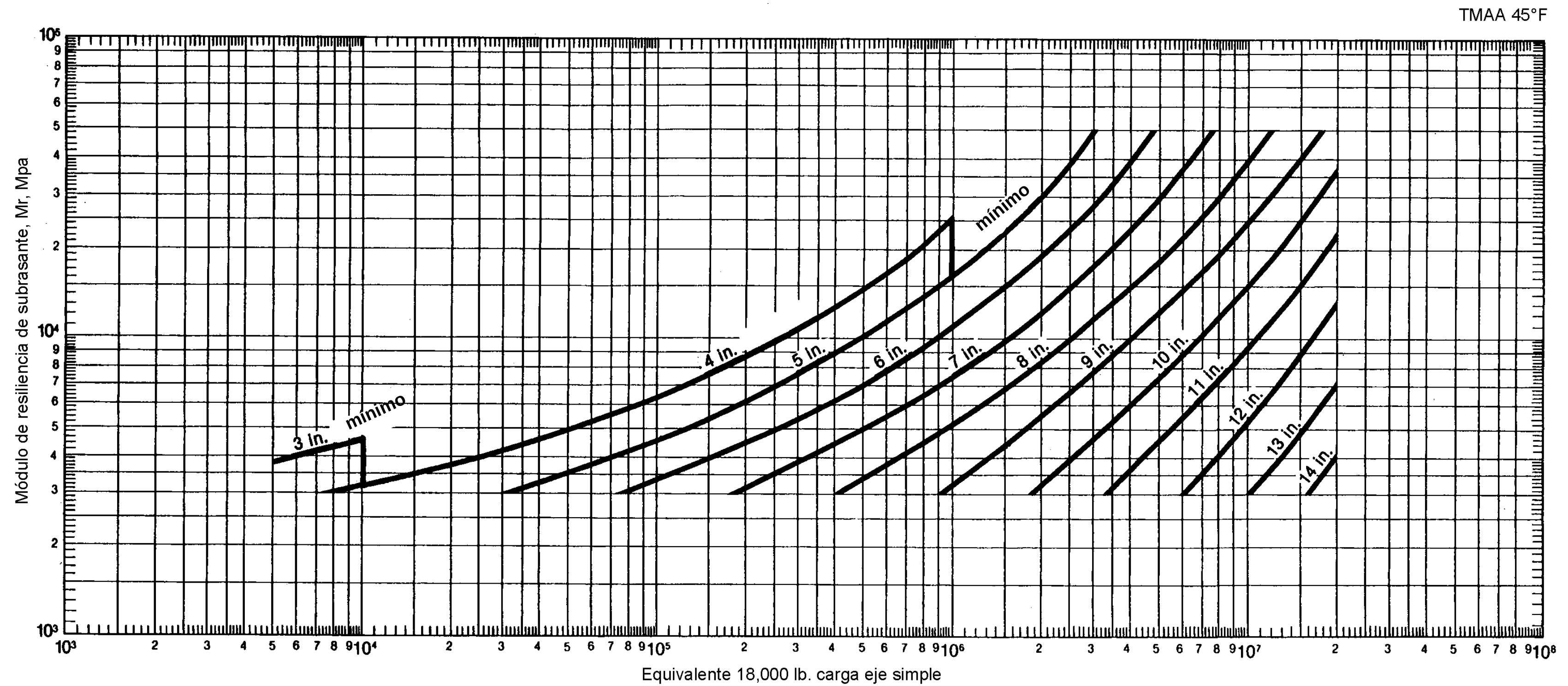


Figura 7-21
Agregado de base de 12 pulgadas de espesor

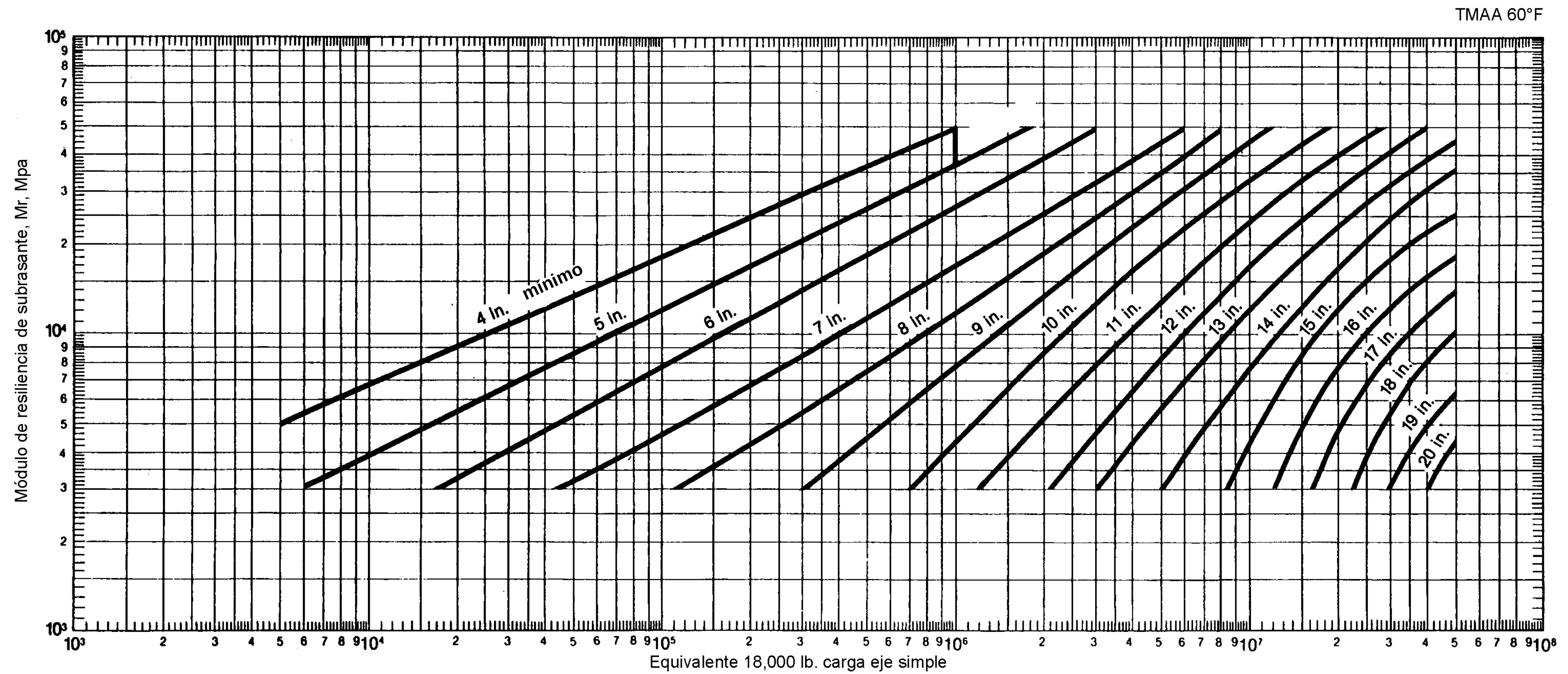


Figura 7-22
Espesor completo del concreto asfáltico

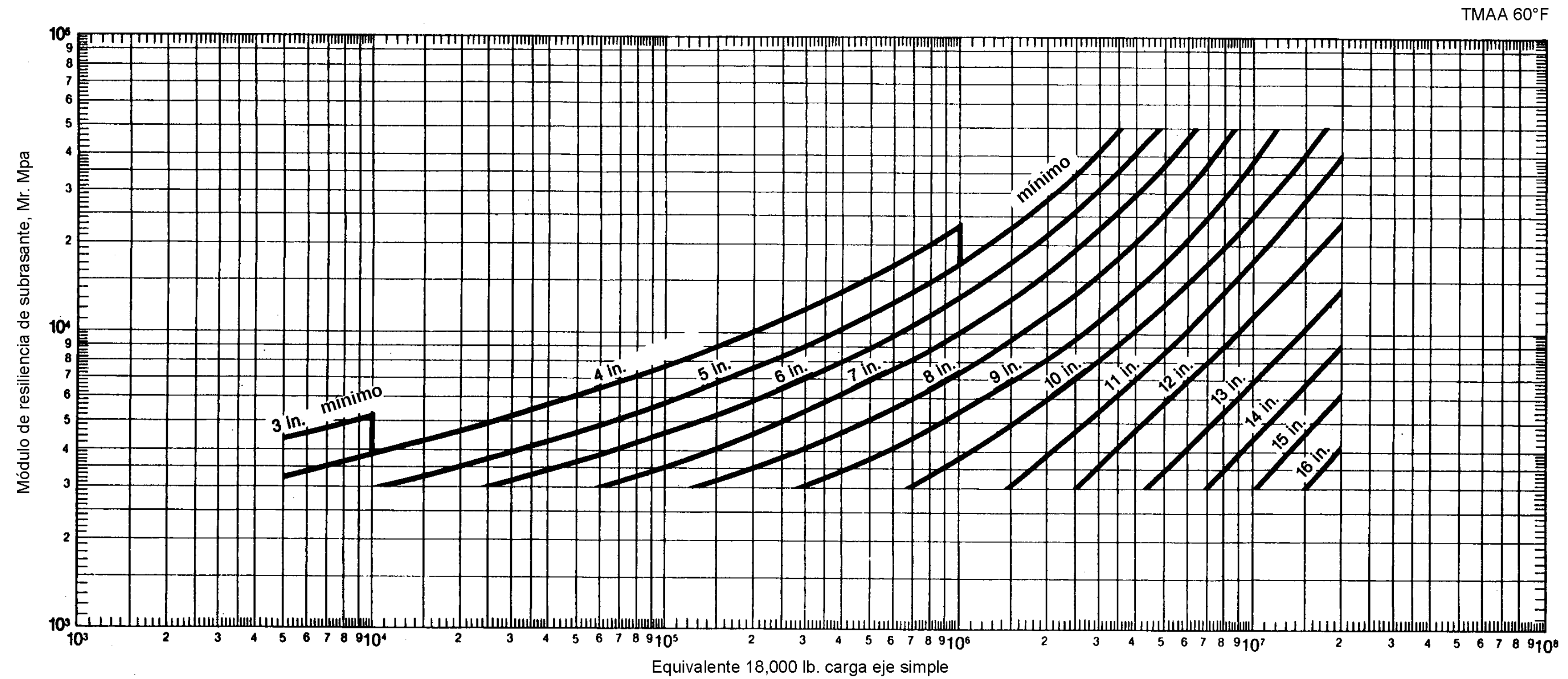


Figura 7-23
Agregado de base de 6 pulgadas de espesor

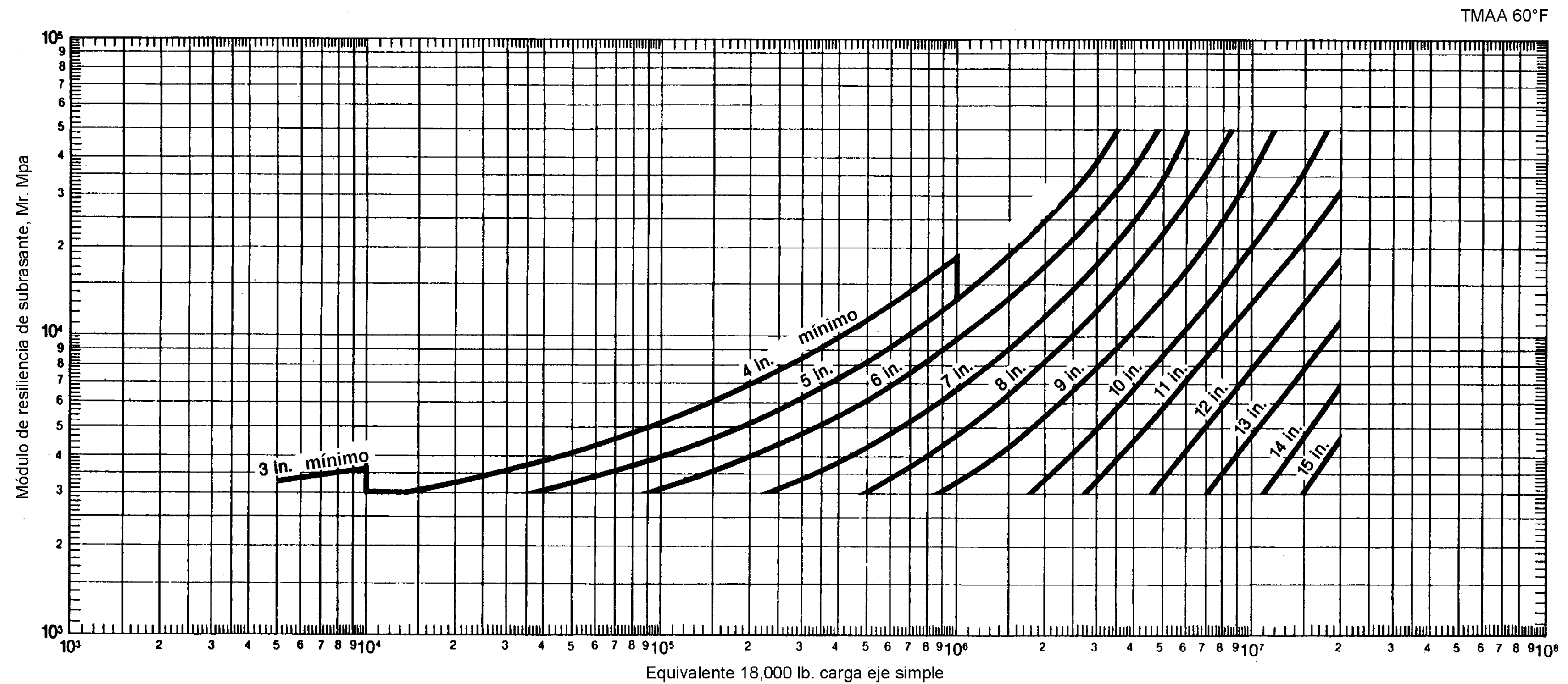


Figura 7-24
Agregado de base de 12 pulgadas de espesor

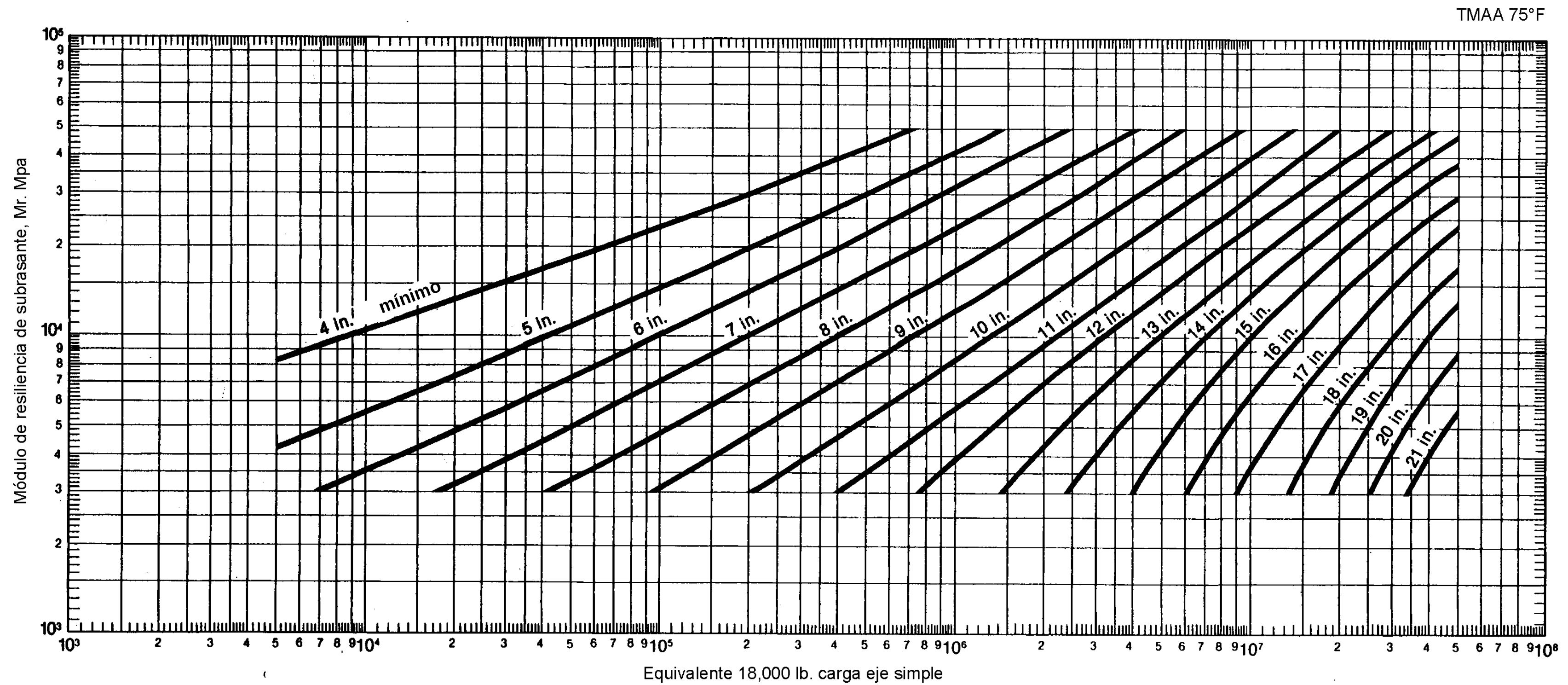


Figura 7-25
Espesor completo de concreto asfáltico

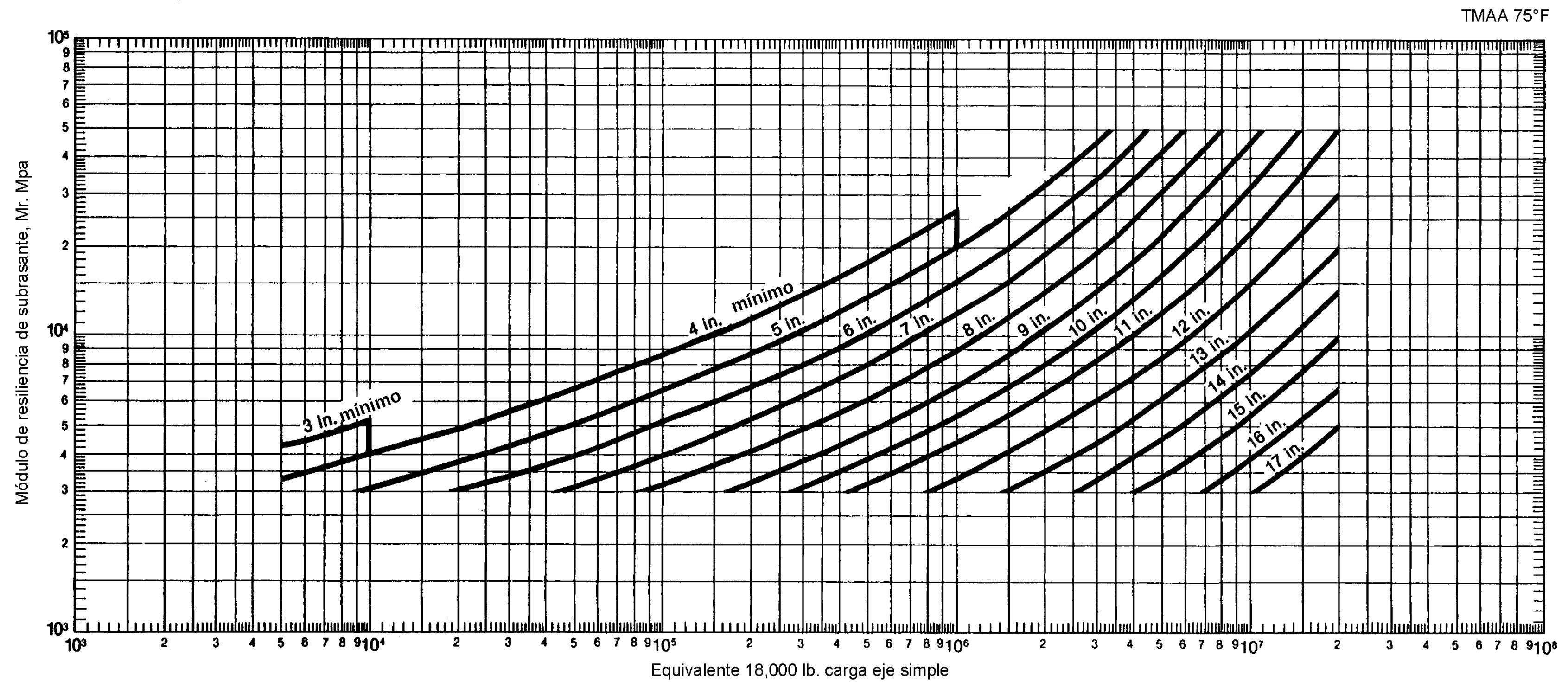


Figura 7-26
Agregado de base de 6 pulgadas de espesor

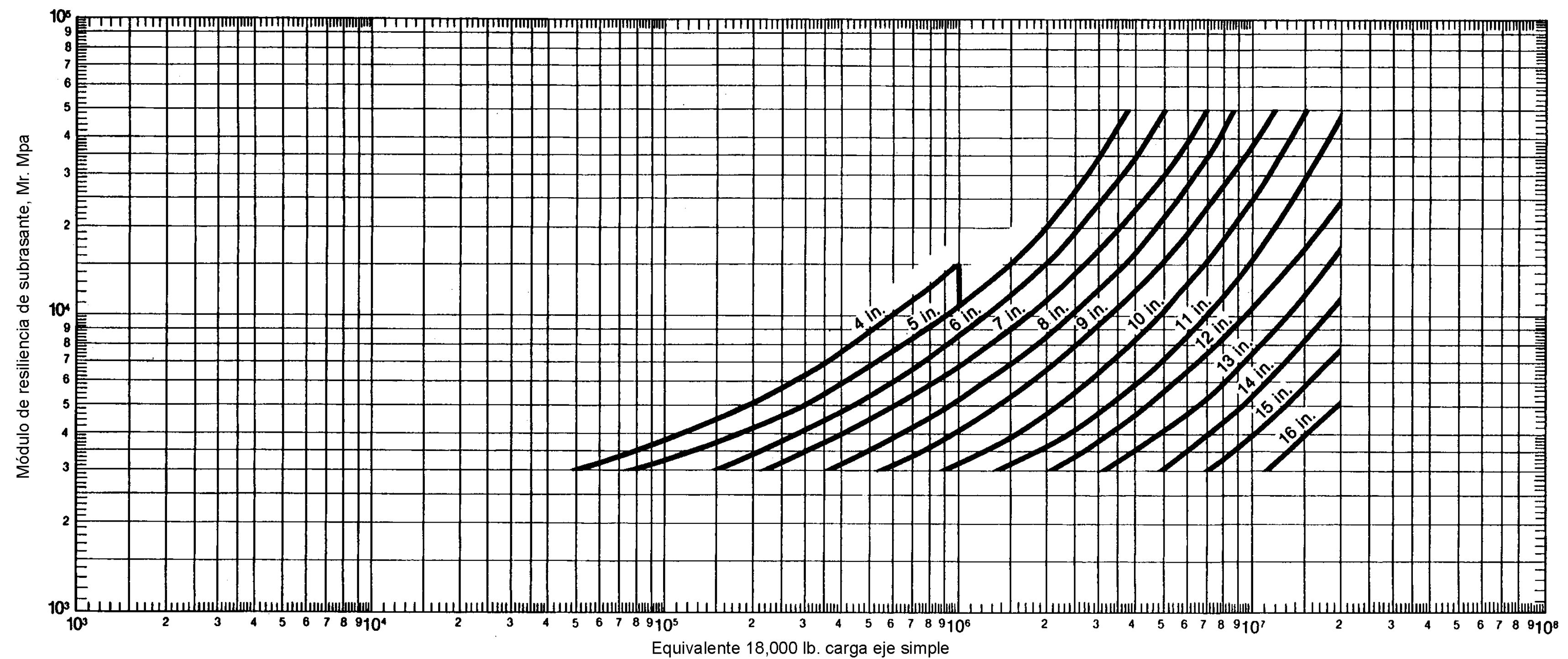


Figura 7-27
Agregado de base de 12 pulgadas de espesor

7.2 Pavimentos Rígidos

Para el diseño de espesores de pavimentos rígidos, descritos en este manual, se usarán dos tipos de métodos, los cuales son los siguientes:

- Método de AASHTO.
- Método del PCA

7.2.1 Método AASHTO.

Para el método AASHTO la fórmula de diseño es:

$$\log_{10}W_{82} = Z_r S_o + 7.35\log_{10}(D + 25.4) - 10.39 + \frac{\log_{10}\left(\frac{\Delta PSI}{4.5-1.5}\right)}{1 + \frac{1.25 \times 10^{19}}{(D + 25.4)^{8.46}}} + (4.22 - 0.32P_t) \times \log_{10}\left(\frac{M_r C_{dx}(0.09D^{0.75} - 1.132)}{1.51 \times J\left(0.09D^{0.75} - \frac{7.38}{(E_c/k)^{0.25}}\right)}\right)$$

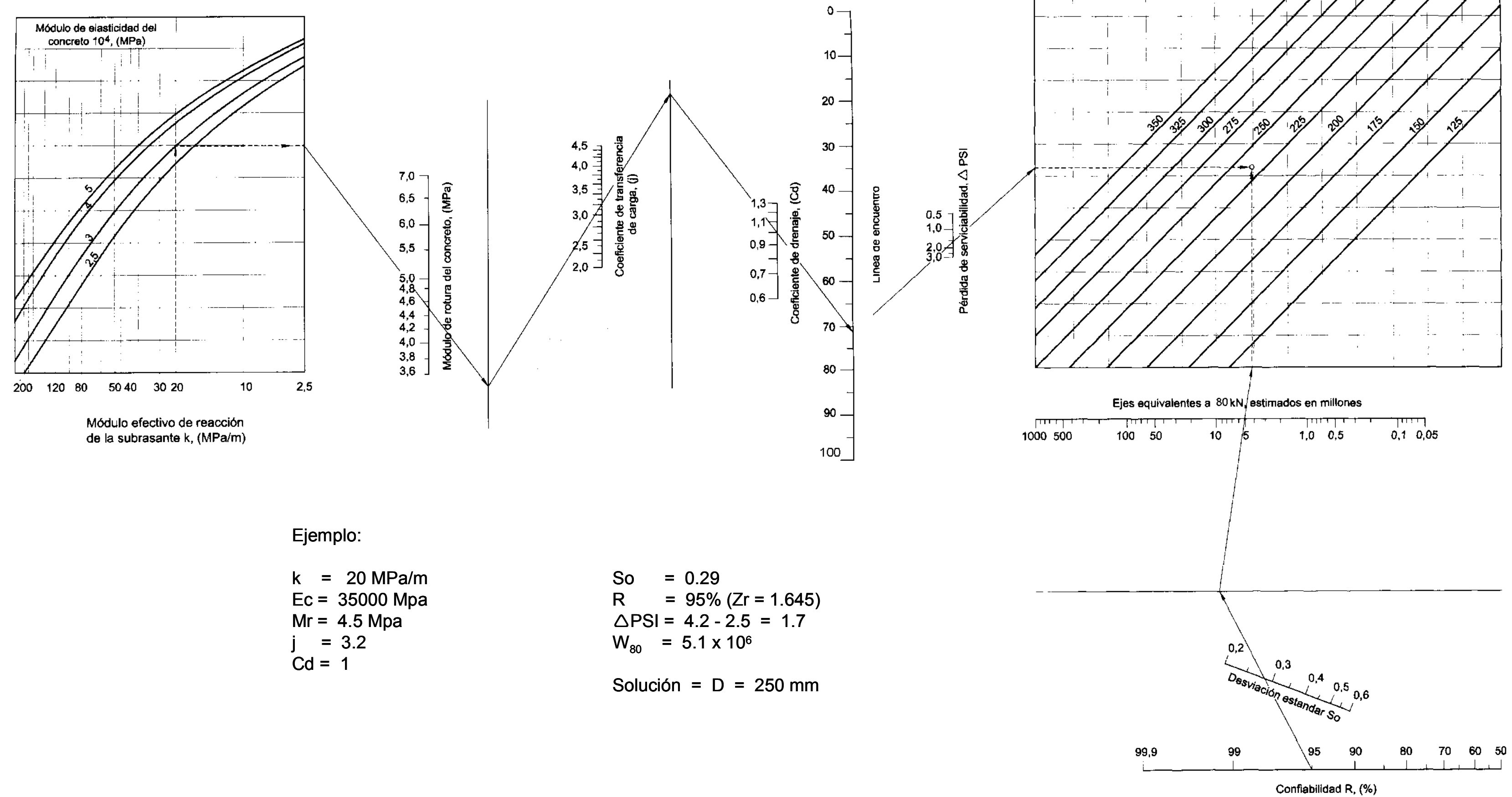
En donde:

W_{82}	=	Número previsto de ejes equivalentes de 8.2 toneladas métricas[5], a lo largo del período de diseño.
Z_r	=	Desviación normal estándar
S_o	=	Error estándar combinado en la predicción del tránsito y en la variación del comportamiento esperado del pavimento
D	=	Espesor de pavimento de concreto, en milímetros
ΔPSI	=	Diferencia entre los índices de servicio inicial y final
P_t	=	Índice de serviciabilidad o servicio final
M_r	=	Resistencia media del concreto (en Mpa) a flexotracción a los 28 días (método de carga en los tercios de la luz)
C_d	=	Coeficiente de drenaje
J	=	Coeficiente de transmisión de cargas en las juntas
E_c	=	Módulo de elasticidad del concreto, en Mpa
k	=	Módulo de reacción, dado en Mpa/m de la superficie (base, subbase o subrasante) en la que se apoya el pavimento de concreto

[5] 18, 000 libras ó 82 kN

Para facilitar la utilización de la ecuación, se ha preparado un nomograma, representado en la figura 7-28

Figura 7-28
Nomograma AASHTO



Ejemplo:

k = 20 MPa/m
Ec = 35000 Mpa
Mr = 4.5 Mpa
j = 3.2
Cd = 1

So = 0.29
R = 95% (Zr = 1.645)
△PSI = 4.2 - 2.5 = 1.7
W_{80} = 5.1 x 10^6

Solución = D = 250 mm

Fuente: Guía para diseño de estructuras de pavimentos, AASHTO, 1,993

a) Variables a considerar en este método

i. Ejes simples equivalentes de 82 kN (W_{80}) a lo largo del período de diseño

En este método se requiere la transformación a ejes simples equivalentes de 82 kN (8.0 Toneladas Métrica ó 18,000 lbs.) los ejes de diferentes pesos que circularán por el pavimento durante su período de diseño. Para ello en el Capítulo 3, se incluyen las tablas de la 3-10 a la 3-18, con los índices de servicio final (P_t **)** para cada uno de los tres tipos de ejes principales (simple, tándem y tridem).

Para el período de diseño, por el tipo de construcción que es, se necesita que este no sea menor a 20 años, con el objeto de poder considerar diferentes alternativas en el plazo que se decida e incluso es recomendable que, durante el período de análisis se incluya por lo menos una rehabilitación.

Conforme el número de carriles en ambas direcciones para efectos de diseño, el tránsito que se debe de tomar en cuenta es el que utiliza el carril objeto de diseño, por lo que generalmente se admite que en cada dirección circula el 50% del tránsito total (del que viaja en las dos direcciones) y que dependiendo del lugar puede variar entre 30% y 70%; conforme la tabla siguiente:

Tabla 7-11
Porcentajes de camiones en el carril de diseño

Número de carriles en ambas direcciones	Porcentaje de camiones en el carril de diseño
2	50
4	45
6 ó más	40

Fuente: Guía para Diseño de Estructuras de pavimentos, AASHTO, 1,993

Conforme el número de carriles en cada dirección, sobre el carril de diseño se puede suponer que circulan los porcentajes de tránsito siguientes:

Tabla 7-12
Número de carriles en una dirección

No. de carriles en una dirección	Porcentaje de ejes simples equivalentes de 82 kN en el carril de diseño
1	100
2	80-100
3	60-80
4	50-75

Fuente: Guía para Diseño de Estructuras de pavimentos, AASHTO, 1,993

ii. Desviación normal estándar Z_r

Esta variable define que, para un conjunto de variables (espesor de las capas, características de los materiales, condiciones de drenaje, etc.) que intervienen en un pavimento, el tránsito que puede soportar el mismo a lo largo de un período de diseño sigue una ley de distribución normal con una media M_t y una desviación típica S_o y por medio de la tabla 7-13 con dicha distribución se obtiene el valor de Z_r en función de un nivel de confiabilidad R, de forma que exista una posibilidad de que 1 – R /100 del tránsito realmente soportado sea inferior a Z_r x S_o.

Tabla 7-13
Valores de Z_r en función de la confiabilidad R

Confiabilidad R, %	Desviación normal estándar Z_r
50	-0.000
60	-0.253
70	-0.524
75	-0.674
80	-0.841
85	-1.037
90	-1.282
91	-1.340
92	-1.405
93	-1.476
94	-1.555
95	-1.645
96	-1.751
97	-1.881
98	-2.054
99	-2.327
99.9	-3.090
99.99	-3.750

Fuente: Guía para Diseño de Estructuras de pavimentos, AASHTO, 1,993

iii. Error estándar combinado S_o

Como lo indicado anteriormente, este valor representa la desviación estándar **conjunta**, e incluye la desviación estándar de la ley de predicción del tránsito en el período de diseño con la desviación estándar de la ley de predicción del comportamiento del pavimento, es decir, el número de ejes que puede soportar un pavimento hasta que su índice de serviciabilidad descienda por debajo de un determinado P_t .

Se recomienda utilizar para S_o valores comprendidos dentro de los intervalos siguientes:

- Para pavimentos rígidos 0.30 – 0.40
  En construcción nueva 0.35
  En sobre-capas 0.40

Los niveles de confiabilidad R en relación al tipo de carretera que se trate pueden ser:

Tabla 7-14
Niveles de confiabilidad R en función del tipo de carretera

Tipo de carretera	Niveles de confiabilidad R	
	Suburbanas	Rurales
Autopista Regional	**85 – 99.9**	**80 – 99.9**
Troncales	**80 - 99**	**75 – 95**
Colectoras	**80 - 95**	**50 - 80**

Fuente: Manual Centroamericano de Normas Para el Diseño Geométrico de las Carreteras Regionales, SIECA, 2,001

El producto de Z_r x S_o efectivamente es un factor de seguridad que se aplica a la estimación del tránsito de una carretera, en la fórmula de diseño de AASHTO, ésta misma recomienda que el factor de seguridad este en función del tránsito que circula sobre el carril de diseño.

Tabla 7-15
Confiabilidad y factores de seguridad recomendados

Tránsito esperado en el carril de diseño en millones de ejes equivalentes	Confiabilidad R	Z_r	S_o	Factor de Seguridad F.S.
<5	50	0.000	0.35	1.00
5 – 15	50 – 60	0.000-0.253	0.35	1.00 – 1.23
15 – 30	60 – 70	0.253 – 0.524	0.35	1.23 – 1.83
30 – 50	70 – 75	0.524 – 0.674	0.34	1.51 – 1.70
50 – 70	75 – 80	0.674 – 0.841	0.32	1.64 – 1.86
70 – 90	80 – 85	0.841 – 1.037	0.30	1.79 – 2.05

Fuente: Diseño, Construcción y Mantenimiento de pavimentos de concreto, Londoño, Cipriano, 2,001.

iv. Variación del índice de serviciabilidad △PSI

Escoger el índice de serviciabilidad final P_t es una selección del valor más bajo que pueda ser admitido, antes de que sea necesario efectuar una rehabilitación, un refuerzo ó una reconstrucción de un pavimento. Como el índice de serviciabilidad final de un pavimento es el valor más bajo de deterioro a que puede llegar el mismo, se sugiere que para carreteras de primer orden (de mayor tránsito) este valor sea de 2.5 y para carreteras menos importantes sea de 2.0; para escoger el valor del índice de serviciabilidad inicial (P_o), es necesario considerar los métodos de construcción, ya que de ésto depende la calidad del pavimento, en los ensayos de pavimentos de AASHO, P o llego a un valor de 4.5 para pavimentos de concreto y 4.2 para pavimentos de asfalto. La diferencia entre el índice de serviciabilidad inicial (P_o) y el índice de serviciabilidad final (P_t) es $\triangle PSI = P_o - P_t$

v. Coeficiente de drenaje C_d

El valor del coeficiente de drenaje está dado por dos variables que son: a) La calidad del drenaje, que viene determinado por el tiempo que tarda el agua infiltrada en ser evacuada de la estructura del pavimento y b) Exposición a la saturación, que es el porcentaje de tiempo durante el año en que un pavimento esta expuesto a niveles de humedad que se aproximan a la saturación. Este porcentaje depende de la precipitación media anual y de las condiciones de drenaje. Para el caso se definen varias calidades de drenaje, como sigue:

Tabla 7-16
Calidad del drenaje

Calidad del drenaje	Tiempo en que tarda el agua en ser evacuada
Excelente	2 horas
Bueno	1 día
Mediano	1 semana
Malo	1 mes
Muy malo	el agua no evacua

Fuente: Guía Para Diseño de Estructuras de Pavimentos, AASHTO, 1,993

Combinando todas las variable que intervienen para llegar a determinar el coeficiente de drenaje C_d se llega a los valores de la siguiente tabla:

Tabla 7-17
Valores de coeficiente de drenaje C_d

Calidad del Drenaje	Porcentaje del tiempo en que la estructura del pavimento esta expuesta a niveles de humedad próximos a la saturación			
	Menos del 1%	1% - 5%	5% - 25%	más del 25%
Excelente	1.25 – 1.20	1.20 – 1.15	1.15 – 1.10	1.10
Bueno	1.20 – 1.15	1.15 – 1.10	1.10 – 1.00	1.00
Mediano	1.15 – 1.10	1.10 – 1.00	1.00 – 0.90	0.90
Malo	1.10 – 1.00	1.00 – 0.90	0.90 – 0.80	0.80
Muy malo	1.00 – 0.90	0.90 – 0.80	0.80 – 0.70	0.70

Fuente: Guía Para Diseño de Estructuras de Pavimentos, AASHTO, 1,993

vi. Coeficiente de transmisión de carga (J)

Este factor se utiliza para tomar en cuenta la capacidad del pavimento de concreto de transmitir las cargas a través de los extremos de las losas (juntas o grietas), su valor depende de varios factores, tales como: Tipo de pavimento (en masa reforzando en las juntas, de armadura continua, etc.); el tipo de borde ù hombro (de asfalto o de concreto unida al pavimento principal). La colocación de elementos de transmisión de carga (pasadores en los pavimentos con juntas, acero en los armados continuos, etc).

En función de estos parámetros, se indican en la siguiente tabla los valores del coeficiente J:

Tabla 7-18
Valores de coeficiente de transmisión de carga J

	hombro			
	Elemento de transmisión de carga			
	Concreto asfáltico		Concreto hidráulico	
Tipo de pavimento	**si**	**no**	**si**	**no**
No reforzado o reforzado con juntas	3.2	3.8 – 4.4	2.5 – 3.1	3.6 – 4.2
Reforzado continuo	2.9 – 3.2	------	2.3 – 2.9	------

Fuente: Guía Para Diseño de Estructuras de Pavimentos, AASHTO, 1,993

Se considera un pavimento rígido confinado, cuando los extremos de las losas tienen elementos de la misma rigidez que ella, para el caso un hombro de concreto confina la parte principal de la carretera y el coeficiente de transmisión de carga tiende a ser menor, por lo tanto la losa también será de menor espesor.

Un hombro de asfalto tiene menor rigidez que la parte principal de la carretera y se considera semi-confinada, por lo que al ser mayor el coeficiente de transmisión de carga el espesor de la losa aumenta.

Dentro de cada intervalo de variación que se ve en la tabla, es recomendable utilizar el valor más alto cuando menor sea el Módulo de reacción de la subrasante k, también cuanto sea más elevado el coeficiente de dilatación térmica del concreto y mayores las variaciones de temperatura ambiente.

En casos de carreteras de poco tránsito, en que el volumen de camiones sea reducido, entonces se pueden utilizar los valores más bajos de J, ya que habrá menos pérdida del efecto de fricción entre los agregados.

vii. Módulo de elasticidad del concreto E_c

El Módulo de elasticidad del concreto (E_c) se puede determinar conforme el procedimiento descrito en la norma ASTM C-469. ò correlacionarlo con otras características del material como es la resistencia a la compresión. En algunos códigos se indica que para cargas instantáneas, el valor del Módulo de Elasticidad (E_c) se puede considerar conforme las ecuaciones de la siguiente tabla:

Tabla 7-19
Correlación entre la resistencia a la compresión y el Módulo de Elasticidad E_c

Tipo de agregado y origen	Módulo de Elasticidad E_c, Mpa	Mòdulo de Elasticidad E_c, Kg/cm^2
Grueso – Ígneo	$E_c = 5{,}500 \times (f'_c)^{1/2}$	$E_c = 17{,}000 \times (f'_c)^{1/2}$
Grueso - Metamórfico	$E_c = 4{,}700 \times (f'_c)^{1/2}$	$E_c = 15{,}000 \times (f'_c)^{1/2}$
Grueso – Sedimentario	$E_c = 3{,}600 \times (f'_c)^{1/2}$	$E_c = 11{,}500 \times (f'_c)^{1/2}$
Sin Información	$E_c = 3{,}900 \times (f'_c)^{1/2}$	$E_c = 12{,}500 \times (f'_c)^{1/2}$

Fuente: Guía Para Diseño de Estructuras de Pavimentos, AASHTO, 1,993

En donde: F'_c = Resistencia a compresión del concreto a los 28 días en Mpa ò kg/cm^2 para obtener E_c en Mpa ò kg/cm^2.

viii. Factor de pérdida de soporte L_s

Este factor, es el valor que se le da a la pérdida de soporte que pueden llegar a tener las losas de un pavimento de concreto, por efecto de la erosión en la subbase por corrientes de agua ò por los asentamientos diferenciales de la subrasante.

Este factor no aparece en forma directa en la fórmula de diseño para obtener el espesor de un pavimento de concreto; pero si está en forma indirecta a través de la reducción del Módulo de reacción efectivo de la superficie (subrasante) en que se apoyan las losas.

En la siguiente tabla se dan valores de L_s para distintos tipos de subbases y bases.

Tabla 7-20
Valores del factor de pérdida de soporte L_s, por el tipo de subbase o base

Tipos de subbase o base	Factor de pérdida de soporte
Subbases granulares tratadas con cemento (Mr : de 7,000 a 14,000 Mpa)	0.00 a 1.00
Subbases tratadas con cemento (Mr : de 3,500 a 7,000 Mpa)	0.00 a 1.00
Bases asfálticas (Mr : de 2,500 a 7,000 Mpa)	0.00 a 1.00
Subbases estabilizadas con asfalto (Mr : de 300 a 2,000 Mpa)	0.00 a 1.00
Estabilización con cal (Mr : de 150 a 1,000 Mpa)	1.00 a 3.00
Materiales granulares sin tratar (Mr : de 100 a 300 Mpa)	1.00 a 3.00
Suelos finos y subrasantes naturales (Mr : de 20 a 300 Mpa)	2.00 a 3.00

Fuente: Guía Para Diseño de Estructuras de Pavimentos, AASHTO, 1,993

En caso de que utilizándose subbases no erosionables, se llega a producir en la subrasante asentamientos diferenciales, por el hecho de la existencia de arcillas higroscópicas ò por la excesiva expansión durante las épocas de heladas, deben adoptarse valores de L_s entre 2.0 y 3.0; el efecto que produce la pérdida del valor soporte en la reducción del Módulo de Reacción efectivo k se encuentra en la figura 7-29.

viii. Módulo de reacción k

El Módulo de reacción (k) de la superficie en que se apoya el pavimento de concreto ò Módulo efectivo de la subrasante, es el valor de la capacidad soporte del suelo, la cual depende del Módulo de Resiliencia de la subrasante y subbase, asì como el Módulo de Elasticidad de la subbase.

Para la determinación del Módulo de elasticidad de la subbase, es factible la correlación con el uso de otros parámetros, tales como: CBR y valor R. Es recomendable que el Módulo de elasticidad de la subbase no sea mayor de 4 veces del valor de la subrasante.

Ya que el valor del Módulo de resiliencia (Mr) de la subrasante, cambia a lo largo del año debido a ciclos de enfriamiento y calentamiento, para determinar el valor efectivo del módulo de reacción de la subrasante (k), es necesario calcularlo para cada mes del año.

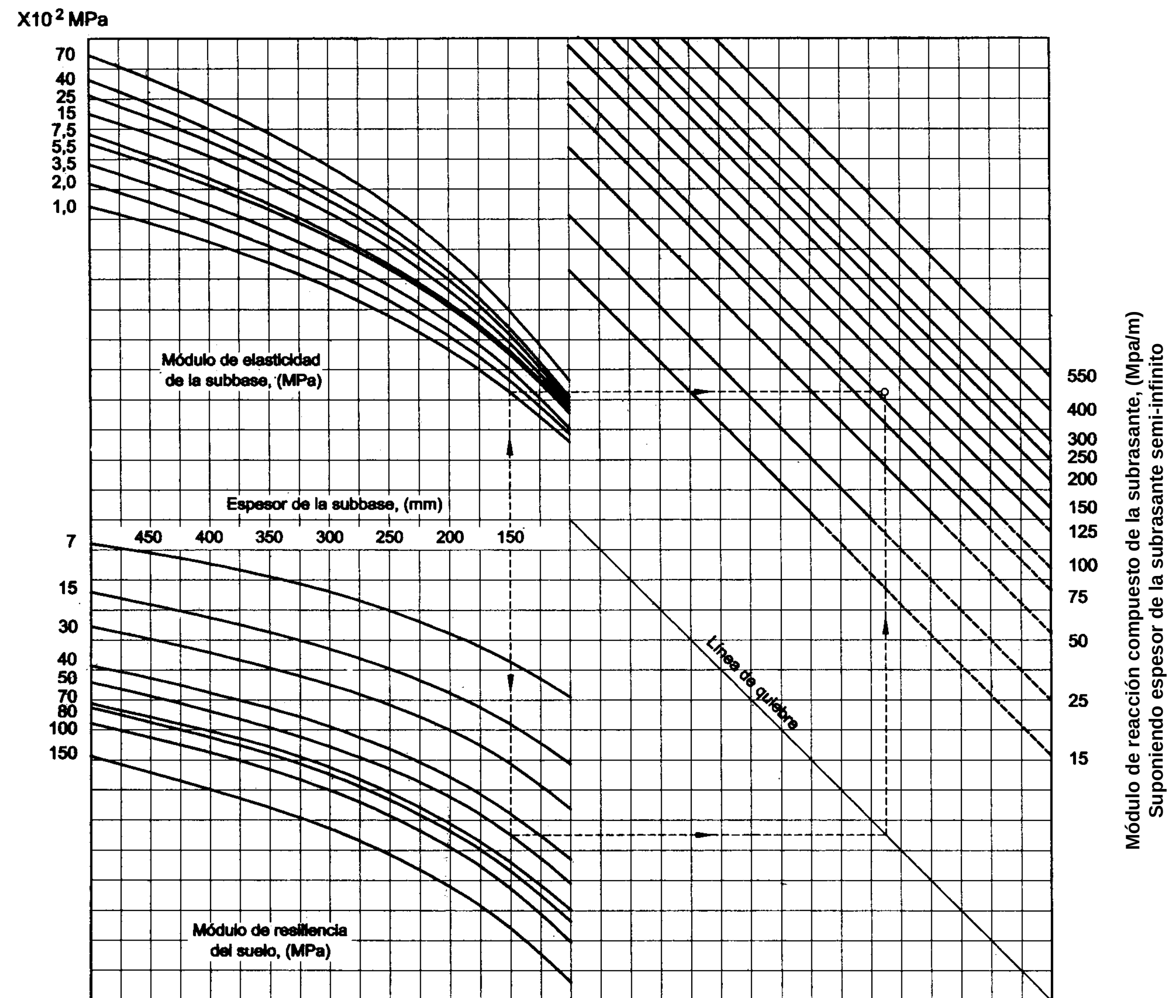
Analizar el siguiente ejemplo:
Datos:

Espesor de la subbase	b= 150 mm
Módulo de elasticidad de la subbase:	E_{sb}= 140 Mpa
Módulo de resiliencia:	Mr= 49 Mpa
Módulo de reacción efectiva de la subrasante:	k= 20 Mpa/m
Módulo de elasticidad del concreto:	E_c= 30,000
Resistencia medio del concreto a flexotracciòn:	MR= 4.5 Mpa
Coeficiente de transmisión de carga con hombros de asfalto y dovelas:	J= 3.2
Coeficiente de drenaje:	C_d= 1.0
Error estándar combinado:	S_0= 0.29
Confiabilidad:	R= 95%
Pérdida de serviciabilidad:	$\triangle PSI = P_0 - P_t = 4.2 - 2.5 = 1.7$
Total de ejes equivalentes de 82 kN (18,000 lbs):	$W_{82} = 5.1 \times 10^6$

1. Haciendo uso del nomograma de la Figura 7-29, en el que se tienen como variables de entrada el Módulo de resiliencia de la subrasante, el espesor de la subbase y el coeficiente de elasticidad de la misma, se obtiene el Módulo de reacción compuesto de la subrasante.

2. Si la subrasante está sobre un estrato de roca a menos de 3 metros de profundidad, el Módulo de reacción compuesto obtenido en el paso anterior, hay que corregirlo utilizando las curvas de la Figura 7-30.

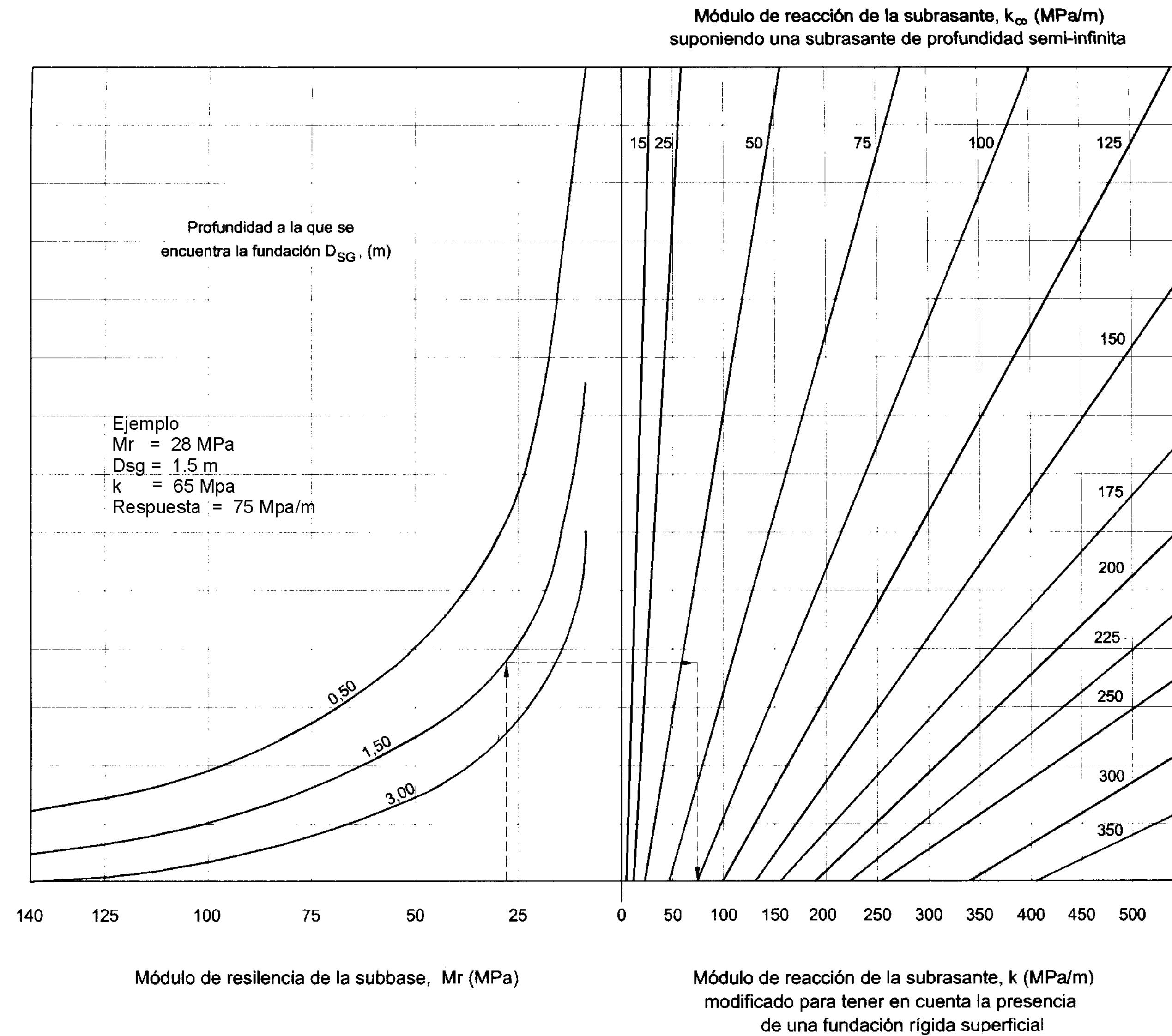
Figura 7-29
Nomograma para determinar el módulo de reacción compuesto de la subrasante, suponiendo una profundidad infinita



Ejemplo:
Espesor de la subbase = 150 mm
Módulo de elasticidad de la subbase E_{sb} = 140 Mpa
Modulo de resiliencia Mr = 49 Mpa
Resiliencia = 110 Mpa/m

Fuente: Guía para diseño de estructuras de pavimentos, AASHTO, 1,993

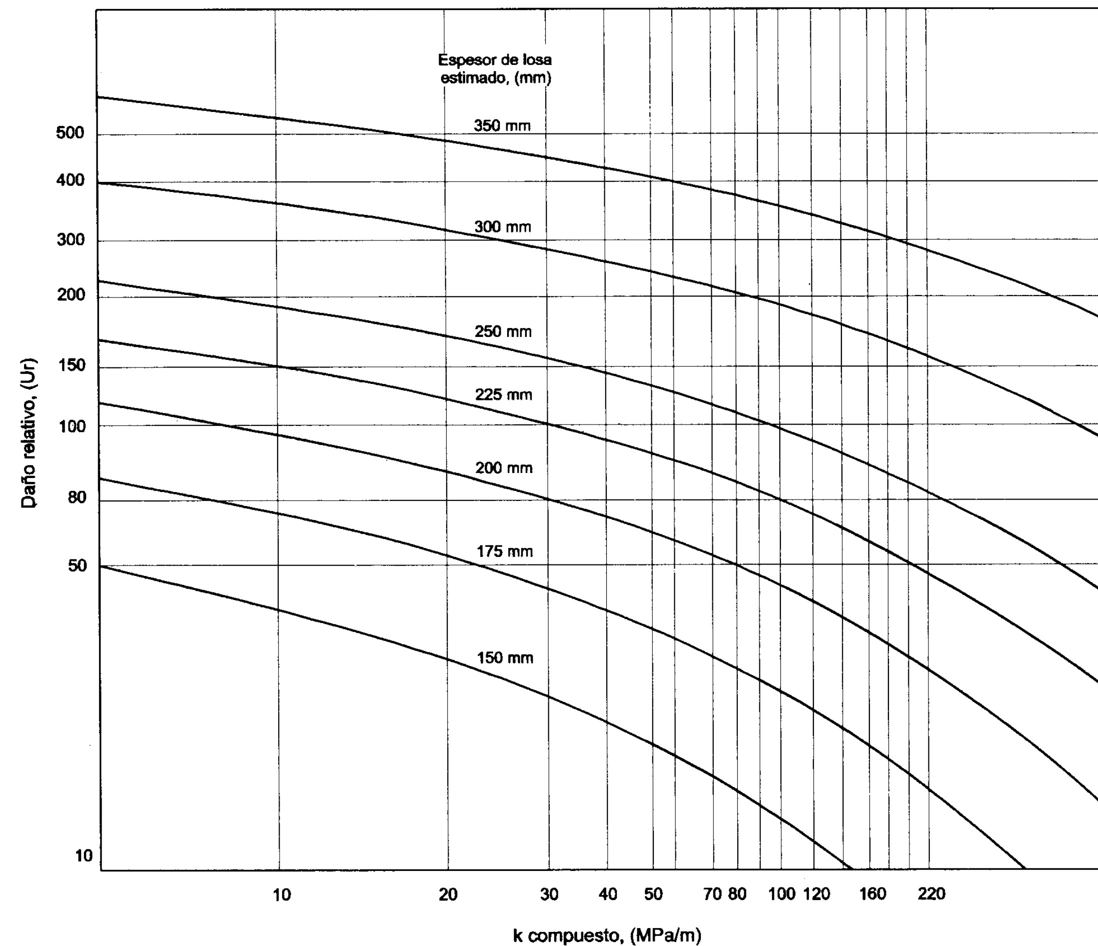
Figura 7-30
Nomograma para corregir el valor de k por la presencia de una capa rígida (estrato de roca a menos de 3 metros de profundidad)



Fuente: Guía para diseño de estructuras de pavimentos, AASHTO, 1,993

3. En otra forma, asumiendo un espesor inicial de losa y con la ayuda del nomograma de la figura 7-31, se obtiene el valor relativo de deterioro (U_f) en cada mes del año, para cada uno de los valores de k, en función del espesor de losa propuesta, similar a lo calculado en la Tabla 4-1.

Figura 7-31
Nomograma para determinar el deterioro relativo, U_f

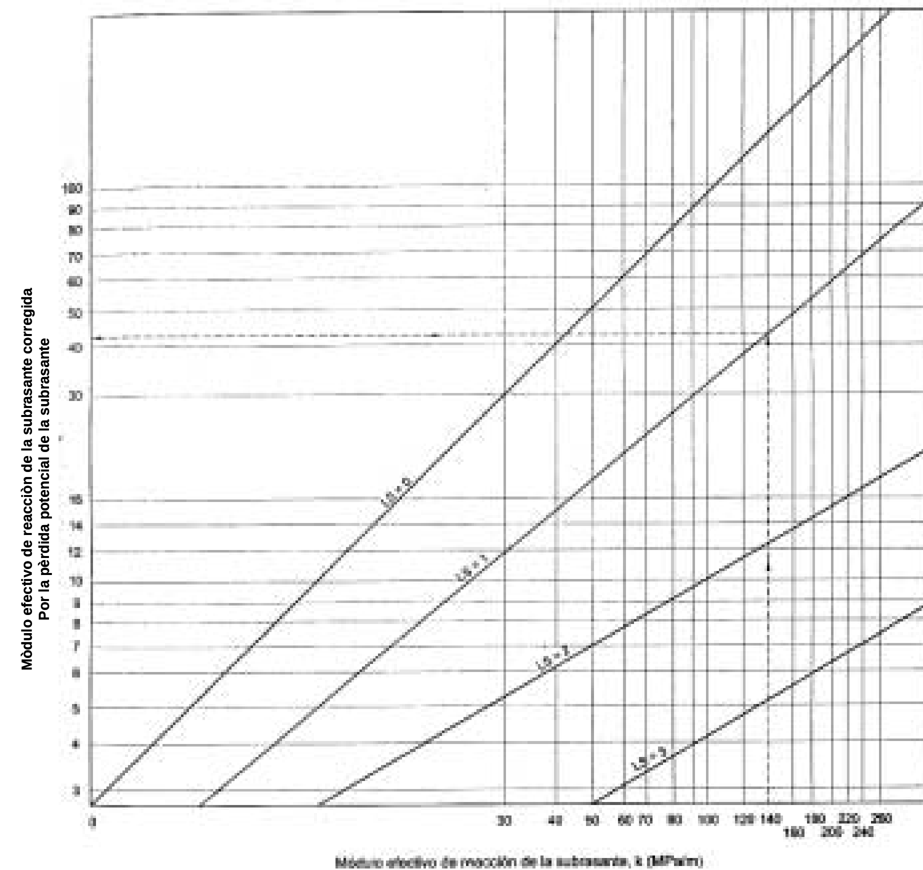


Fuente: Guía para diseño de estructuras de pavimentos, AASHTO, 1,993

4. Sumando todos los valores relativos de deterioro (U_f) y dividiendo el total entre el número de meses incluidos y entrando con este valor en la figura 7-31, se obtiene el valor promedio del coeficiente k para el espesor asumido.

5. Para finalizar se corrige el valor promedio de k en función de la pérdida de soporte L_s por medio de la figura 7-32.

Figura 7-32
Nomograma para corregir el Módulo de reacción efectivo por pérdida potencial de soporte de la subbase



Fuente: Guía para diseño de estructuras de pavimentos, AASHTO, 1,993

7.2.2 Método de Portland Cement Association (PCA)

Este método se aplica a diferentes tipos de pavimentos rígidos, tales como:

- Los pavimentos de concreto simple, se construyen sin acero de refuerzo y sin varillas de transferencia (dovelas) de carga en las juntas, ya que la transferencia se logra a través del esfuerzo de corte proporcionado por los agregados situados en las caras agrietadas que se forman por el corte de la junta entre losas contiguas; para que ésta transferencia sea efectiva es necesario que la longitud de las losas sean cortas.

- Los pavimentos de concreto simple con varillas de transferencia de carga (dovelas), se construyen sin acero de refuerzo, pero en las juntas de contracción se colocan varillas lisas que tienen la función de transmitir cargas a las otras losas; para este caso, es necesario que las losas también sean cortas con el objeto de tener mejor control sobre los agrietamientos.

- La pavimentos de concreto reforzado tienen acero de refuerzo dentro de la losa así como varillas de transferencia de carga (dovelas) en las juntas de contracción. Las separaciones en las juntas son mayores a las que se utilizan en pavimentos convencionales, por lo que es posible que se produzcan más fisuras transversales las cuales se mantienen prácticamente cerradas debido al refuerzo de acero, lo que permite una mejor transferencia de cargas.

- Los pavimentos de refuerzo continuo, se construyen sin juntas de contracción; por tener una alta y continua cantidad de acero de refuerzo en dirección longitudinal, estos pavimentos desarrollan fisuras transversales en intervalos relativamente cortos, pero debido al acero de refuerzo producen un alto grado de transferencia de cargas en las caras de las fisuras.

a) Elementos básicos.

En pavimentos de concreto simple, el espaciamiento entre juntas no debe exceder los 4.50 metros, para que las losas tengan un buen comportamiento. En pavimentos con dovelas, las losas no deben ser mayores de 6.00 metros y en pavimentos reforzados las losas no deben ser mayores de 12.00 metros, lo cual permite un buen comportamiento, ya que espaciamientos mayores a los mencionados, produce problemas tanto en las juntas como en las fisuras transversales intermedias.

El procedimiento de diseño desarrollado por PCA, establece varias condiciones, tales como:

- La transferencia de cargas, dependiendo del tipo de pavimento que se considere.

- El uso de hombros de concreto ó asfalto adheridos al pavimento, permite reducir los esfuerzos de flexión y deflexiones, producidos por las cargas de los vehículos en los bordes de las losas.

- Para reducir los esfuerzos que se producen al paso de las ruedas sobre las juntas, es necesario el uso de subbases estabilizadas, ya que estas proporcionan superficies de soporte de mejor calidad y resistencia a la erosión a causa de las deflexiones de las losas de pavimento.

- Se adicionan dos criterios básicos en el diseño y son:

  i. FATIGA. Esta sirve para mantener los esfuerzos que se producen dentro de los límites de seguridad, ya que el paso de cargas sobre las losas del pavimento producen esfuerzos que se convierten en agrietamientos.

  ii. EROSION: Este sirve para limitar los efectos de deflexión que se producen en los bordes de las losas, juntas y esquinas del pavimento; también para tener control sobre la erosión que se produce en la Subbase ó Subrasante y los materiales que conforman los hombros.

Este criterio es necesario, ya que evita fallas del pavimento, como succión de finos de la capa de apoyo que producen a su vez desnivel entre losas y destrucción de hombros, siendo situaciones independientes de la fatiga.

- Los camiones con ejes tridem se consideran dentro del diseño, a pesar de que los sencillos y los tándem son los más utilizados en las carreteras; los ejes tridem pueden llegar producir más daño por efecto de erosión que por fatiga.

Por lo manifestado anteriormente, seleccionar el espesor de pavimento por este método, depende sustancialmente de suministrar otros factores diferentes a los utilizados comúnmente.

b) Factores de diseño.

Fundamentalmente para desarrollar el diseño de un pavimento rígido, es necesario conocer las condiciones del lugar para escoger el tipo de pavimento que se va a construir, así como las características de la subbase y tipo de hombros a utilizar; el procedimiento se realiza teniendo en cuenta los siguientes factores:

b.1) Resistencia a la flexión del concreto (Módulo de Rotura, MR)

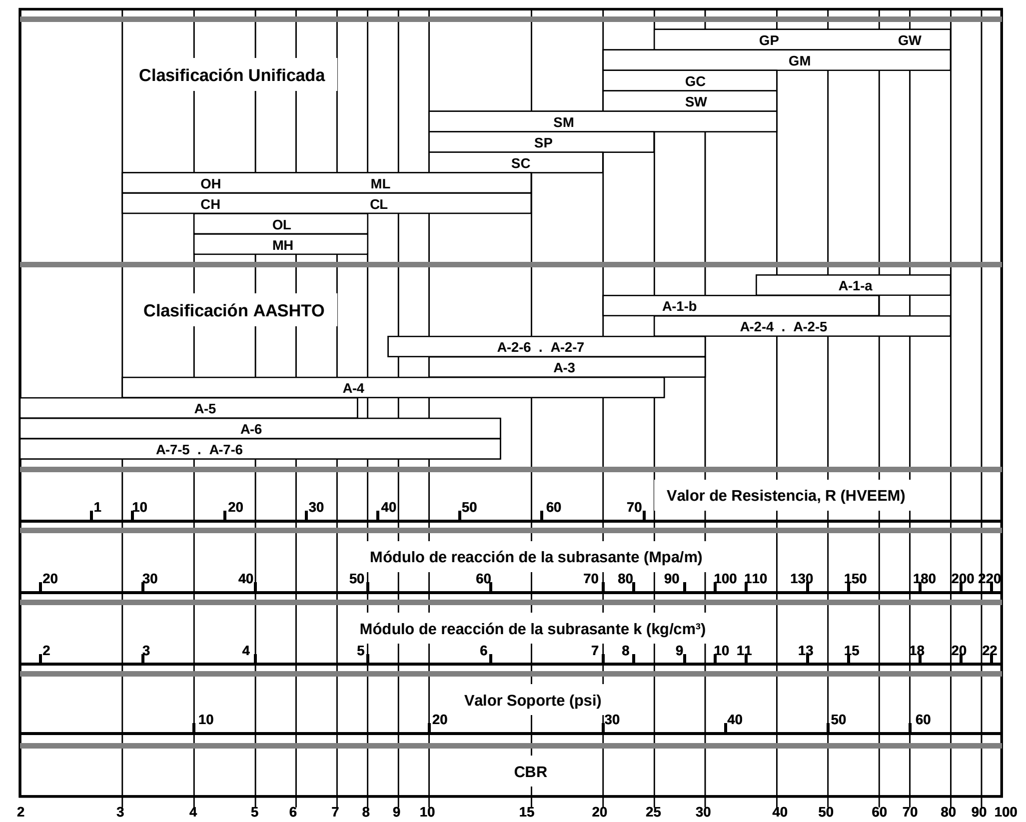
Este valor se utiliza en el diseño, bajo el criterio de la fatiga que sufren los materiales por el paso de las cargas impuestas por los vehículos pesados, que tienden a producir agrietamiento en el pavimento.

La deformación que se produce en el pavimento de concreto por efecto de las cargas, hace que las losas estén sometidas a esfuerzos de tensión y compresión. La relación existente entre las deformaciones debido a las cargas y los esfuerzos de compresión es muy baja como para incidir en el diseño del espesor de la losa. La relación entre la tensión y la flexión son mayores, situación que afecta el espesor de la losa. De lo anterior se deduce que los esfuerzos y la resistencia a la flexión son factores principales a considerar en el diseño de pavimentos rígidos.

b.2) Capacidad soporte de la Subrasante ó de la Subbase (k)

La capacidad soporte, es el valor del Módulo de Reacción (k) de la capa de apoyo de un pavimento de concreto. Este valor se puede estimar por correlación con el CBR ya que no es necesariamente indispensable tener un valor exacto de k, variaciones mayores de este valor no afectan los espesores de diseño. En la Figura 7-30 las relaciones que se muestran son suficientes para el diseño de pavimentos por este método.

Figura 7-33
Correlación aproximada entre la clasificación de los suelos y los diferentes ensayos



Fuente: Generada por el Consultor

Las subbases son necesarias con el objeto de prevenir el efecto de succión, pero además incrementan la capacidad soporte del pavimento, situación que se aprovecha con el objeto de poder reducir el espesor de la losa. En la tabla 7-21 se puede observar como se incrementa el valor de k al colocar una Subbase granular.

Tabla No. 7-21
Efecto de la Subbase granular sobre los valores de k

Valor de k para subrasante		Valor de k para subbase							
		100 mm		150 mm		225 mm		300 mm	
Mpa/m	Lb/pulg³	Mpa/m	Lb/pulg³	Mpa/m	Lb/pulg³	Mpa/m	Lb/pulg³	Mpa/m	Lb/pulg³
20	73	23	85	26	96	35	117	38	140
40	147	45	165	49	180	57	210	66	245
60	220	64	235	66	245	76	280	90	330
80	295	87	320	90	330	100	370	117	430

Fuente: Guía Para Diseño de Estructuras de Pavimentos, AASHTO, 1,993

a.3) Período de diseño.

El período de diseño se considera como el período de análisis del tránsito, ya que es difícil hacer la predicción del tránsito con suficiente aproximación para un largo tiempo. Para un pavimento rígido se considera adecuado tomar 20 años como período de diseño; por lo que el que se elija incide directamente en los espesores, ya que esto determina cuantos vehículos tendrán que circular sobre el pavimento en ese lapso. El seleccionar el período de diseño de un pavimento es función del tipo de carretera, nivel de tránsito, análisis económico y el servicio que preste.

a.4) Tránsito

Las características principales de tránsito que se relacionan con el diseño de pavimentos rígidos son el número de pasadas de ejes y la importancia de las cargas. Las cargas más pesadas por eje que se esperan durante el período de diseño, son las que definen los esfuerzos a los que va a estar sometido dicho pavimento.

Los valores de tránsito a obtener se clasifican así:

- TPD tránsito promedio diario en ambas direcciones.
- TPD-C tránsito promedio diario de vehículos pesados en ambas direcciones.
- Cargas por eje de los vehículos pesados.

El dato necesario para obtener el tránsito de diseño, consiste en asumir tasas de crecimiento anual que relacionen factores de proyección; en la tabla 7-22 se presenta la relación entre las tasas de crecimiento anual y los factores de proyección para períodos de 20 y 40 años, conforme las recomendaciones de PCA.

Tabla 7-22
Tasas anuales de crecimiento con sus correspondientes factores de proyección.

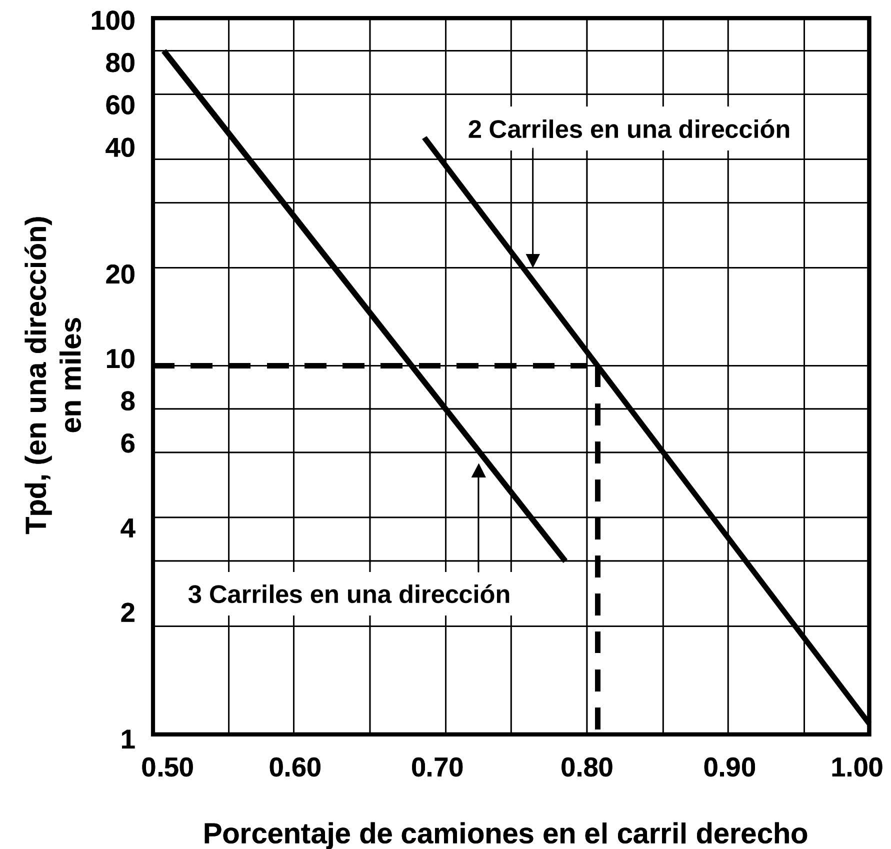
Tasas de crecimiento anual de tránsito, %	Factores de proyección	
	20 años	40 años
1	1.1	1.2
1 1/2	1.2	1.3
2	1.2	1.5
2 1/2	1.3	1.6
3	1.3	1.8
3 1/2	1.4	2.0
4	1.5	2.2
4 1/2	1.6	2.4
5	1.6	2.7
5 1/2	1.7	2.9
6	1.8	3.2

Fuente: Guía Para Diseño de Estructuras de Pavimentos, AASHTO, 1,993

El TPD-C es un dato importante en el diseño de pavimentos, ya que incluye buses y camiones con 6 ruedas ó más y excluye los vehículos que tienen hasta 4 ruedas . Es conveniente para propósitos de diseño calcular el número total de vehículos pesados esperados durante el período de diseño.

Regularmente, se asume que las cargas y volúmenes de tránsito se distribuyen en partes iguales en las dos direcciones, pero esto no es real en su totalidad, ya que puede suceder en casos específicos, que la mayor parte de los camiones viaje a plena carga en una dirección y retornen vacíos en la otra. Para vías de cuatro carriles ó más, el porcentaje de vehículos comerciales debe de ajustarse utilizando la Figura 7-34

Figura 7-34
Porcentaje de camiones en el carril de diseño en una carretera de varios carriles.



Fuente: Guía para diseño de estructuras de pavimentos, AASHTO, 1,993

a.5) Factor de seguridad de carga.

Este método de diseño exige que las cargas reales esperadas se multipliquen por factores de seguridad de carga (F_{sc}), para lo cual se recomienda lo siguiente:

- Para vías que tiene múltiples carriles, en los cuales se espera un flujo de tráfico interrumpido con un elevado volumen de tránsito pesado, F_{sc} = 1.2

- Para carreteras y vías urbanas en las que el tránsito esperado es de un volumen moderado de vehículos pesados F_{sc} = 1.1

- Para calles residenciales y otras que soporten bajo volumen de tránsito de camiones, F_{sc} = 1.0

Además de los factores de seguridad de carga, el método es conservador ya que incluye situaciones de tránsito de camiones muy cargados, variaciones en los materiales, proceso constructivo y espesor de las capas. En algunos casos se podría justificar el empleo de un factor 1.3 con el objeto de mantener un nivel de serviciabilidad mayor durante el período de diseño, por ejemplo: una autopista de tránsito muy alto y sin rutas alternas de desvío.

b) Diseño de espesores

En la hoja de trabajo HT - 01 se muestra el formato para el desarrollo del diseño y para utilizarlo se necesitan datos de entrada, factores de diseño, etc., tales como:

- Tipo de hombros y juntas

- Resistencia a la flexión del concreto ó Módulo de rotura

- Módulo de reacción de la subrasante (k)

- Factor de seguridad de carga (F_{sc})

- Distribución de cargas por eje

- Número de repeticiones esperadas de las diversas cargas por eje, en el carril de diseño durante el período de diseño.

Formato de la Hoja de Trabajo HT – 01
Cálculo de espesores de pavimento

Proyecto:
Espesor de tanteo: mm Juntas con dovelas SI___NO___
Conjunto subbase-subrasante Mpa/m Berma de concreto SI___NO___
Módulo de rotura, MR Mpa Período de diseño________años
Factor de seguridad

Carga por eje, kN	Carga por FSC, kn	Repeticiones Esperadas	Análisis por fatiga		Análisis por erosión	
			Repeticiones admisibles	Porcentaje de fatiga	Repeticiones admisibles	Porcentaje de daño
1	2	3	4	5	6	7

Ejes sencillos — 8 Esfuerzo equivalente; 9 Relación de esfuerzos; 10 Factor de erosión

Eje Tándem — 11 Esfuerzo equivalente; 12 Relación de esfuerzos; 13 Factor de erosión

			Total		Total	

Ejemplo: En la hoja de trabajo HT - 02 se analizan dos tipos de situaciones:

- Análisis de fatiga, para controlar el agrietamiento por fatiga
- Análisis de erosión, para control de la erosión en la fundación, los hombros, el bombeo de la subbase y el desnivel entre las losas.

Hoja de Trabajo HT – 02
Cálculo de espesores de pavimento

Proyecto:
Espesor de tanteo: 260 mm — Juntas con dovelas SI___NO___
Conjunto subbase-subrasante 80 Mpa/m — Berma de concreto SI___NO___
Módulo de rotura, MR 4.5 Mpa — Período de diseño 20 años
Factor de seguridad, Fsc 1.2

Carga por eje, kN	Carga por FSC, kn	Repeticiones Esperadas	Análisis por fatiga		Análisis por erosión	
			Repeticiones admisibles	Porcentaje de fatiga	Repeticiones admisibles	Porcentaje de daño
1	2	3	4	5	6	7
Ejes sencillos		8 Esfuerzo equivalente 1.10 / 9 Relación de esfuerzos 0.24			10 Factor de erosión 2.69	
133	159.60	6,310	5,000,000	0.13	820,000	0.77
125	150.00	14,690	ilimitado		1,200,000	1.22
115	138.00	30,130	ilimitado		2,000,000	1.51
107	128.40	64,380	ilimitado		3,100,000	2.08
98	117.60	106,900	ilimitado		5,500,000	1.94
89	106.80	235,700	ilimitado		9,000,000	2.62
80	96.00	307,200	ilimitado		22,000,000	1.4
Eje Tándem		11 Esfuerzo equivalente 0.97 / 12 Relación de esfuerzos 0.22			13 Factor de erosión 2.87	
231	277.20	21,320	ilimitado	0	570,000	3.74
213	255.60	42,870	ilimitado		900,000	4.76
195	234.00	124,900	ilimitado		1,500,000	8.33
178	213.60	372,900	ilimitado		2,400,000	15.54
160	192.00	885,800	ilimitado		4,800,000	18.45
142	170.40	930,700	ilimitado		18,000,000	5.17
125	150.00	1,656,000	ilimitado		50,000,000	3.31
			Total	0.13	Total	70.84

El procedimiento para el diseño es el siguiente:

1. Se colocan los datos básicos de entrada en la parte superior de la hoja de trabajo.

2. En la columna 1 se colocan los valores de la carga por eje en kN, de cada tipo y clase de vehículo sencillo ó tándem.

3. En la columna 3 se colocan las cantidades de repeticiones esperadas para cada clase de vehículo.

4. En la columna 2 se coloca el producto de la columna 1 por el factor de seguridad de carga (F_{sc}).

Seguidamente se procede a efectuar el análisis de fatiga, tomando como base la Figura 7-35 y las tablas 7-23, 7-24, 7-25 y 7-26, ya que se utilizan las mismas, tanto para pavimentos de concreto simple, con pasadores o sin ellos, como para pavimentos con refuerzo continuo; la diferencia se establece si el pavimento tiene hombros ó no.

Los pasos a seguir son:

5. En la tabla correspondiente, sea eje sencillo o tándem, sin hombro , tablas 7-23 y 7-24, o con hombro , tablas 7-25 y 7-26, se hallan los esfuerzos equivalentes en función del espesor de la losa asumido en mm. y el valor k; es necesario hacer interpolaciones si el valor de k no esta en la tabla.

   Los valores encontrados se colocan frente a los números 8 y 11 de la hoja de trabajo.

6. Los valores colocados frente a los números 8 y 11, se dividen entre el valor del Módulo de Rotura (MR), y el resultado de cada uno se coloca frente a los números 9 y 12, que son los factores de Relación de Esfuerzos.

7. En la figura 7-35, con el valor de carga por eje de la columna 2 en la hoja de trabajo y usando la línea vertical (ejes simples ó tándem) y el factor de relación de esfuerzos (números 9 ó 12) en la línea inclinada, se traza una línea entre cada uno de estos puntos y se proyecta hacia la línea vertical de la extrema derecha de la figura, en la cual se lee el valor de las repeticiones admisibles y estos valores se colocan en la columna No. 4.

8. Seguidamente los valores de la columna 3 se dividen entre los valores de la columna 4 y el resultado de cada uno se multiplica por 100 y se coloca en la columna 5.

9. La suma de todos los valores colocados en la columna 5, es la absorción total de fatiga.

Figura 7-35
Análisis de fatiga. Repeticiones admisibles en función de la relación de esfuerzos en pavimentos con y sin hombros de concreto

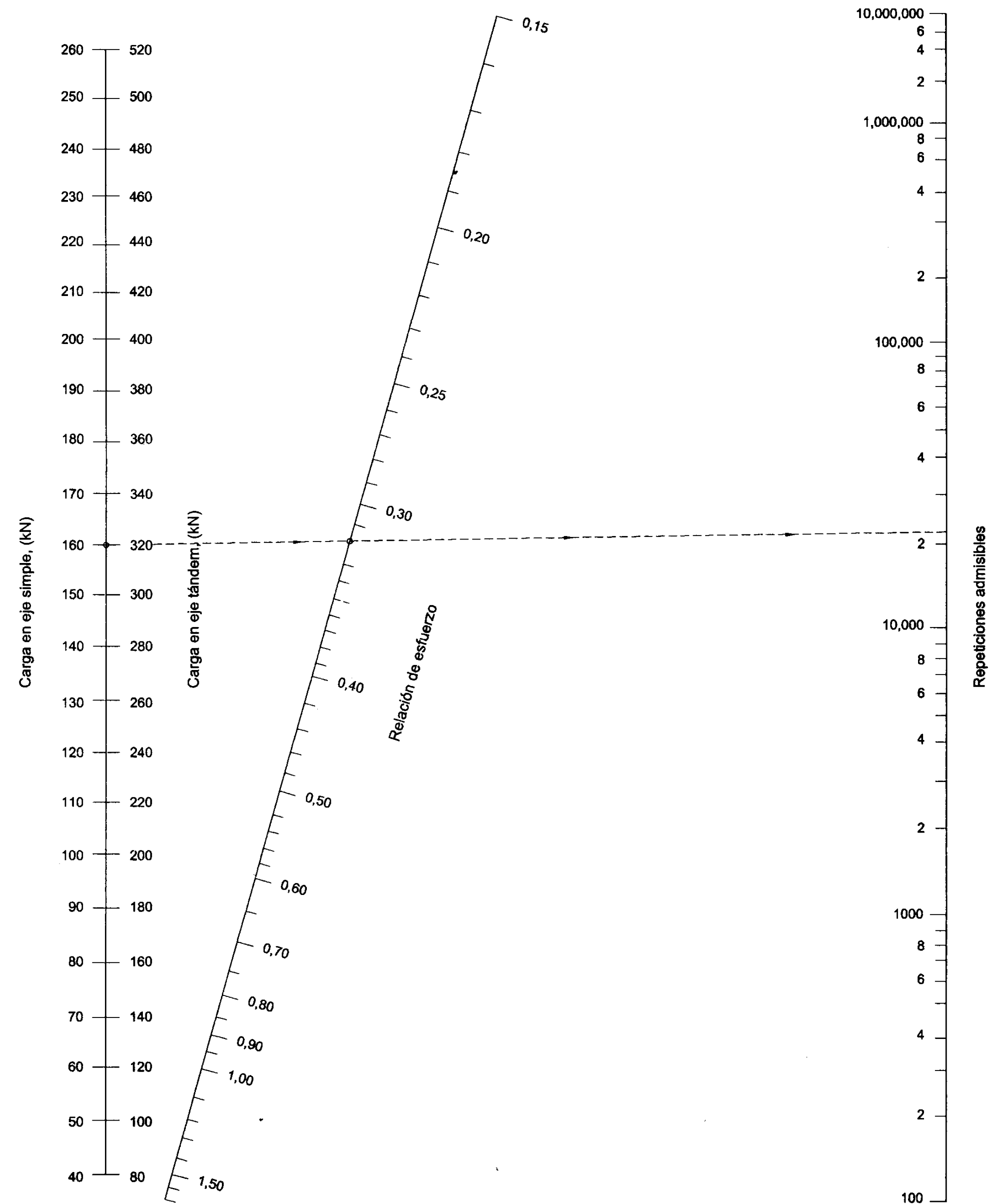


Tabla 7-23
Esfuerzo equivalente pavimento sin hombros de concreto hidráulico (eje sencillo)

Eje sencillo						
Espesor de losa (mm)	k del conjunto subrasante / subbase					
	20	40	60	80	140	180
100	5.42	4.75	4.38	4.13	3.66	3.45
110	4.74	4.16	3.85	3.63	3.23	3.06
120	4.19	3.69	3.41	3.23	2.88	2.73
130	3.75	3.30	3.06	2.89	2.59	2.46
140	3.37	2.97	2.76	2.61	2.34	2.23
150	3.06	2.70	2.51	2.37	2.13	2.03
160	2.79	2.47	2.29	2.17	1.95	1.86
170	2.56	2.26	2.10	1.99	1.80	1.71
180	2.37	2.09	1.94	1.84	1.66	1.58
190	2.19	1.94	1.80	1.71	1.54	1.47
200	2.04	1.80	1.67	1.59	1.43	1.37
210	1.91	1.68	1.56	1.48	1.34	1.28
220	1.79	1.57	1.46	1.39	1.26	1.20
230	1.68	1.48	1.38	1.31	1.18	1.13
240	1.58	1.39	1.30	1.23	1.11	1.03
250	1.49	1.32	1.22	1.16	1.05	1.00
260	1.41	1.25	1.16	1.10	0.99	0.95
270	1.34	1.18	1.10	1.04	0.94	0.90
280	1.28	1.12	1.04	0.99	0.89	0.86
290	1.22	1.07	0.99	0.94	0.85	0.81
300	1.16	1.02	0.95	0.90	0.81	0.78
310	1.11	0.97	0.90	0.86	0.77	0.74
320	1.06	0.93	0.86	0.82	0.74	0.71
330	1.02	0.89	0.83	0.78	0.71	0.68
340	0.98	0.85	0.79	0.75	0.68	0.65
350	0.94	0.82	0.76	0.72	0.65	0.62

Tabla 7-24
Esfuerzo equivalente pavimento sin hombros de concreto hidráulicos (eje tándem)

Eje Tándem						
Espesor de losa (mm)	k del conjunto subrasante / subbase					
	20	40	60	80	140	180
100	4.39	3.83	3.59	3.44	3.22	3.15
110	3.88	3.35	3.12	2.97	2.76	2.68
120	3.47	2.98	2.75	2.62	2.40	2.33
130	3.14	2.68	2.46	2.33	2.13	2.05
140	2.87	2.43	2.23	2.10	1.90	1.83
150	2.64	2.23	2.04	1.92	1.72	1.65
160	2.45	2.03	1.87	1.76	1.57	1.50
170	2.28	1.91	1.74	1.63	1.45	1.38
180	2.14	1.79	1.62	1.51	1.34	1.27
190	2.01	1.67	1.51	1.41	1.25	1.18
200	1.90	1.58	1.42	1.33	1.17	1.11
210	1.79	1.49	1.34	1.25	1.10	1.04
220	1.70	1.41	1.27	1.18	1.03	0.98
230	1.62	1.34	1.21	1.12	0.98	0.92
240	1.55	1.28	1.15	1.06	0.93	0.87
250	1.48	1.22	1.09	1.01	0.88	0.83
260	1.41	1.17	1.05	0.97	0.84	0.79
270	1.36	1.12	1.00	0.93	0.80	0.75
280	1.30	1.07	0.96	0.89	0.77	0.72
290	1.25	1.03	0.92	0.85	0.74	0.69
300	1.21	0.99	0.89	0.82	0.71	0.66
310	1.16	0.96	0.86	0.79	0.68	0.64
320	1.12	0.92	0.83	0.76	0.66	0.62
330	1.09	0.89	0.80	0.74	0.63	0.59
340	1.05	0.86	0.77	0.71	0.61	0.57
350	1.02	0.84	0.75	0.69	0.59	0.55

Tabla 7-25
Esfuerzo equivalente pavimento con hombros de concreto hidráulico (eje sencillo)

Eje sencillo						
Espesor de losa (mm)	k del conjunto subrasante / subbase					
	20	40	60	80	140	180
100	4.18	3.65	3.37	3.19	2.85	2.72
110	3.68	3.23	2.99	2.83	2.55	2.43
120	3.28	2.88	2.67	2.54	2.29	2.19
130	2.95	2.60	2.41	2.29	2.07	1.99
140	2.68	2.36	2.19	2.08	1.89	1.81
150	2.44	2.15	2.00	1.90	1.73	1.66
160	2.24	1.97	1.84	1.75	1.59	1.53
170	2.06	1.82	1.70	1.62	1.48	1.42
180	1.91	1.69	1.57	1.50	1.37	1.32
190	1.77	1.57	1.46	1.40	1.28	1.23
200	1.65	1.46	1.37	1.30	1.19	1.15
210	1.55	1.37	1.28	1.22	1.12	1.08
220	1.45	1.29	1.20	1.15	1.05	1.01
230	1.37	1.21	1.13	1.08	0.99	0.96
240	1.29	1.15	1.07	1.02	0.94	0.90
250	1.22	1.08	1.01	0.97	0.89	0.86
260	1.16	1.03	0.96	0.92	0.84	0.81
270	1.10	0.98	0.91	0.87	0.80	0.77
280	1.05	0.93	0.87	0.83	0.76	0.74
290	1.00	0.89	0.83	0.79	0.73	0.70
300	0.95	0.85	0.79	0.76	0.70	0.67
310	0.91	0.81	0.76	0.72	0.67	0.64
320	0.87	0.78	0.73	0.69	0.64	0.62
330	0.84	0.74	0.70	0.67	0.61	0.59
340	0.80	0.71	0.67	0.64	0.59	0.57
350	0.77	0.69	0.64	0.61	0.57	0.55

Tabla 7-26
Esfuerzo equivalente pavimento con hombros de concreto hidráulico (eje tándem)

Eje tándem						
Espesor de losa (mm)	k del conjunto subrasante / subbase					
	20	40	60	80	140	180
100	3.48	3.10	2.94	2.85	2.74	2.72
110	3.07	2.71	2.56	2.47	2.35	2.32
120	2.75	2.41	2.26	2.17	2.05	2.02
130	2.49	2.17	2.02	1.94	1.82	1.78
140	2.27	1.97	1.83	1.75	1.63	1.59
150	2.08	1.80	1.67	1.59	1.48	1.44
160	1.93	1.66	1.53	1.46	1.35	1.31
170	1.79	1.54	1.42	1.35	1.24	1.20
180	1.67	1.43	1.32	1.25	1.15	1.11
190	1.57	1.34	1.23	1.17	1.07	1.03
200	1.48	1.26	1.16	1.10	1.00	0.96
210	1.40	1.19	1.09	1.03	0.93	0.90
220	1.32	1.12	1.03	0.97	0.88	0.85
230	1.26	1.07	0.98	0.92	0.83	0.80
240	1.20	1.01	0.93	0.87	0.79	0.76
250	1.14	0.97	0.88	0.83	0.75	0.72
260	1.09	0.92	0.84	0.79	0.71	0.68
270	1.04	0.88	0.81	0.76	0.68	0.65
280	1.00	0.85	0.77	0.73	0.65	0.62
290	0.96	0.81	0.74	0.70	0.62	0.60
300	0.93	0.78	0.71	0.67	0.60	0.57
310	0.89	0.75	0.69	0.64	0.58	0.55
320	0.86	0.73	0.66	0.62	0.55	0.53
330	0.83	0.70	0.64	0.60	0.53	0.51
340	0.80	0.68	0.62	0.58	0.52	0.49
350	0.78	0.66	0.60	0.56	0.50	0.47

Seguidamente se procede a efectuar el análisis de erosión, tomando como base la Figura 7-36 y las tablas 7-27, 7-28, 7-29 y 7-30, ya que estas se utilizan para pavimentos de concreto con dovelas y sin hombros, sin dovelas y sin hombros. La Figura 7-37 y las tablas 7-31, 7-32, 7-33 y 7-34, se utilizan para pavimentos de concreto con dovelas y con hombros, con dovelas y con hombros.

Los pasos a seguir continúan así:

10. En la tabla correspondiente, sea eje sencillo o tandem, con dovelas y sin hombros, Tablas 7-27 y 7-28 o sin dovelas y sin hombros, Tablas 7-29 y 7-30 o con dovelas y con hombros Tablas 7-31 y 7-32 y sin dovelas y con hombros, Tablas 7-33 y 7-34 y las Figuras 7-36 y 7-37, se halla el factor de erosión en función del espesor de la losa asumido en mm. y el valor k; es necesario hacer interpolaciones si el valor de k no esta en la tabla. Los valores encontrados se colocan frente a los números 10 y 13 de la hoja de trabajo.

11. En las Figuras 7-36 o 7-37, con el valor de carga por eje de la columna 2 en la hoja de trabajo y usando la línea vertical (ejes simples ó tandem) y el factor de erosión (números 10 ó 13) en la otra línea vertical, se traza una línea entre cada uno de estos puntos y se proyecta hacia la línea vertical de la extrema derecha de la figura, en la cual se lee el valor de las repeticiones admisibles y estos valores se colocan en la columna No. 6.

12. Seguidamente los valores de la columna 3 se dividen entre los valores de la columna 6 y el resultado de cada uno se multiplica por 100 y se coloca en la columna 7.

13. La suma de todos los valores colocados en la columna 7, es el daño total por erosión.

Al utilizar las tablas para encontrar el esfuerzo equivalente ó el factor de erosión, es necesario que las interpolaciones sean exactas, en el caso de las figuras para encontrar las repeticiones admisibles, la interpolación debe aproximarse a valores enteros.

El espesor de losa asumido para efectuar el tanteo, se considerará no adecuado si los totales del factor de fatiga, así como los totales del factor de erosión son mayores al 100%; esto quiere decir que el espesor de losa asumido es deficiente, por lo que habrá que hacer otro tanteo con un espesor mayor; si los totales de fatiga y erosión fueran menores que 100%, es necesario hacer un nuevo tanteo con un espesor menor .   ya que esto involucra economía

Figura 7-36
Análisis de erosión, sin hombros de concreto. Repeticiones admisibles en función del factor de pavimentos sin hombros de concreto hidráulico

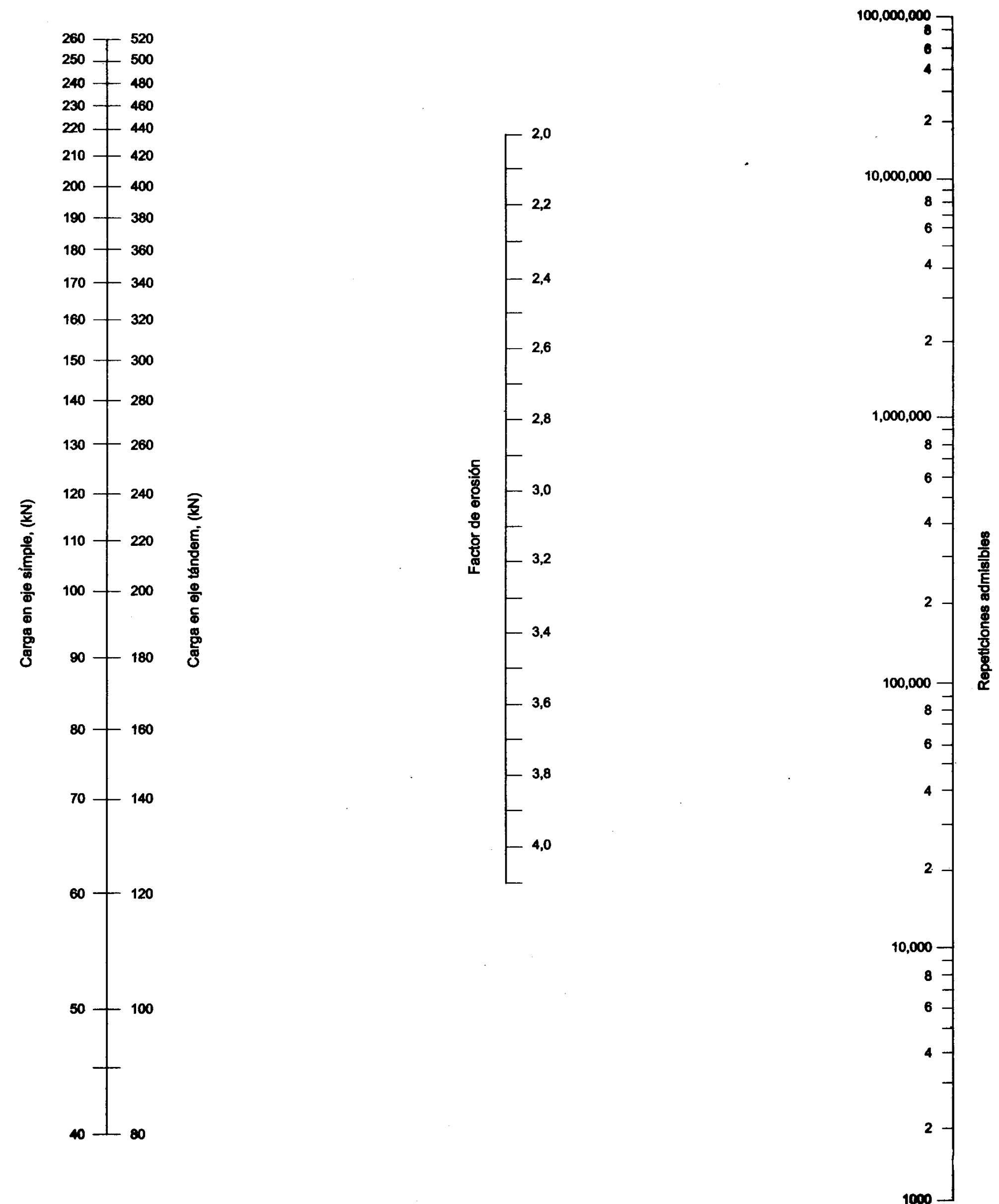


Tabla 7-27
Factor de erosión para ejes sencillos. Pavimentos de concreto hidráulico con dovelas y sin hombros de concreto Hidráulico

Eje sencillo						
Espesor de losa (mm)	k del conjunto subrasante / subbase					
	20	40	60	80	140	180
100	3.76	3.75	3.74	3.74	3.72	3.70
110	3.63	3.62	3.61	3.61	3.59	3.58
120	3.52	3.50	3.49	3.49	3.47	3.46
130	3.41	3.39	3.39	3.38	3.37	3.35
140	3.31	3.30	3.29	3.28	3.27	3.26
150	3.22	3.21	3.20	3.19	3.17	3.16
160	3.14	3.12	3.11	3.10	3.09	3.08
170	3.06	3.04	3.03	3.02	3.01	3.00
180	2.99	2.97	2.96	2.95	2.93	2.92
190	2.92	2.90	2.88	2.88	2.86	2.85
200	2.85	2.83	2.82	2.81	2.79	2.78
210	2.79	2.77	2.75	2.75	2.73	2.72
220	2.73	2.71	2.69	2.69	2.67	2.66
230	2.67	2.65	2.64	2.63	2.61	2.60
240	2.62	2.60	2.58	2.57	2.55	2.54
250	2.57	2.54	2.53	2.52	2.50	2.49
260	2.52	2.49	2.48	2.47	2.45	2.44
270	2.47	2.44	2.43	2.42	2.40	2.39
280	2.42	2.40	2.38	2.37	2.35	2.34
290	2.38	2.35	2.34	2.33	2.31	2.30
300	2.34	2.31	2.30	2.29	2.26	2.26
310	2.29	2.27	2.25	2.24	2.22	2.21
320	2.25	2.23	2.21	2.20	2.18	2.17
330	2.21	2.19	2.17	2.16	2.14	2.13
340	2.18	2.15	2.14	2.12	2.10	2.09
350	2.14	2.11	2.10	2.09	2.07	2.06

Tabla 7-28
Factor de erosión para ejes Tándem. Pavimentos de concreto hidráulico con dovelas y sin hombros de concreto hidráulico

Eje tándem						
Espesor de losa (mm)	k del conjunto subrasante / subbase					
	20	40	60	80	140	180
100	3.83	3.79	3.77	3.76	3.72	3.70
110	3.71	3.67	3.65	3.63	3.60	3.58
120	3.61	3.56	3.54	3.52	3.49	3.47
130	3.52	3.47	3.44	3.43	3.39	3.37
140	3.43	3.38	3.35	3.33	3.30	3.28
150	3.36	3.30	3.27	3.25	3.21	3.19
160	3.28	3.22	3.19	3.17	3.13	3.12
170	3.22	3.15	3.12	3.10	3.06	3.04
180	3.16	3.09	3.06	3.03	2.99	2.97
190	3.10	3.03	2.99	2.97	2.93	2.91
200	3.05	2.97	2.94	2.91	2.87	2.85
210	2.99	2.92	2.88	2.86	2.81	2.79
220	2.95	2.87	2.83	2.80	2.76	2.73
230	2.90	2.82	2.78	2.75	2.70	2.68
240	2.86	2.78	2.73	2.71	2.66	2.63
250	2.82	2.73	2.69	2.66	2.61	2.59
260	2.78	2.69	2.65	2.62	2.56	2.54
270	2.74	2.65	2.61	2.58	2.52	2.50
280	2.71	2.62	2.57	2.54	2.48	2.46
290	2.67	2.58	2.53	2.50	2.44	2.42
300	2.64	2.55	2.50	2.46	2.41	2.38
310	2.61	2.51	2.46	2.43	2.37	2.34
320	2.58	2.48	2.43	2.40	2.33	2.31
330	2.55	2.45	2.40	2.36	2.30	2.28
340	2.52	2.42	2.37	2.33	2.27	2.24
350	2.49	2.39	2.34	2.30	2.24	2.21

Tabla 7-29
Factor de erosión para ejes sencillos. Pavimentos de concreto hidráulico sin dovelas y sin hombros de concreto hidráulico

Eje sencillo						
Espesor de losa (mm)	k del conjunto subrasante / subbase					
	20	40	60	80	140	180
100	3.94	3.92	3.90	3.88	3.84	3.80
110	3.82	3.79	3.78	3.76	3.72	3.69
120	3.71	3.68	3.67	3.65	3.62	3.59
130	3.61	3.58	3.56	3.55	3.52	3.50
140	3.52	3.49	3.47	3.46	3.43	3.41
150	3.43	3.40	3.38	3.37	3.34	3.32
160	3.35	3.32	3.30	3.29	3.26	3.24
170	3.28	3.24	3.22	3.21	3.18	3.17
180	3.21	3.17	3.15	3.14	3.11	3.10
190	3.15	3.11	3.08	3.07	3.04	3.03
200	3.09	3.04	3.02	3.01	2.98	2.96
210	3.04	2.99	2.96	2.95	2.92	2.90
220	2.98	2.93	2.90	2.89	2.86	2.85
230	2.93	2.88	2.85	2.83	2.80	2.79
240	2.89	2.83	2.80	2.78	2.75	2.74
250	2.84	2.78	2.75	2.73	2.70	2.69
260	2.80	2.73	2.70	2.69	2.65	2.64
270	2.76	2.69	2.66	2.64	2.61	2.59
280	2.72	2.65	2.62	2.60	2.56	2.55
290	2.68	2.61	2.58	2.56	2.52	2.50
300	2.65	2.57	2.54	2.52	2.48	2.46
310	2.61	2.54	2.50	2.48	2.44	2.42
320	2.58	2.50	2.47	2.44	2.40	2.38
330	2.55	2.47	2.43	2.41	2.36	2.35
340	2.52	2.44	2.40	2.37	2.33	2.31
350	2.49	2.41	2.37	2.34	2.29	2.28

Tabla 7-30
Factor de erosión para ejes tándem. Pavimentos de concreto hidráulico sin dovelas y sin hombros de concreto hidráulico

Eje tándem						
Espesor de losa (mm)	k del conjunto subrasante / subbase					
	20	40	60	80	140	180
100	4.00	3.93	3.90	3.88	3.84	3.82
110	3.90	3.82	3.79	3.76	3.72	3.70
120	3.81	3.73	3.69	3.66	3.62	3.59
130	3.73	3.65	3.60	3.57	3.52	3.49
140	3.66	3.57	3.52	3.49	3.43	3.41
150	3.59	3.50	3.45	3.42	3.36	3.33
160	3.53	3.42	3.38	3.35	3.28	3.26
170	3.48	3.37	3.32	3.28	3.22	3.19
180	3.42	3.32	3.26	3.23	3.16	3.13
190	3.37	3.27	3.21	3.17	3.10	3.07
200	3.33	3.22	3.16	3.12	3.05	3.01
210	3.28	3.17	3.11	3.07	3.00	2.96
220	3.24	3.13	3.07	3.03	2.95	2.92
230	3.20	3.09	3.03	2.98	2.91	2.87
240	3.16	3.05	2.99	2.94	2.86	2.83
250	3.13	3.01	2.95	2.91	2.82	2.79
260	3.09	2.98	2.91	2.87	2.79	2.75
270	3.06	2.94	2.88	2.83	2.75	2.71
280	3.03	2.91	2.84	2.80	2.71	2.68
290	3.00	2.88	2.81	2.77	2.68	2.64
300	2.97	2.85	2.78	2.74	2.65	2.61
310	2.94	2.82	2.75	2.71	2.62	2.58
320	2.91	2.79	2.72	2.68	2.59	2.55
330	2.89	2.77	2.70	2.65	2.56	2.52
340	2.86	2.74	2.67	2.62	2.53	2.49
350	2.84	2.71	2.65	2.60	2.51	2.47

Figura 7-37
Análisis de erosión, con hombros de concreto. Repeticiones admisibles en función del factor de pavimentos con hombros de concreto hidráulico

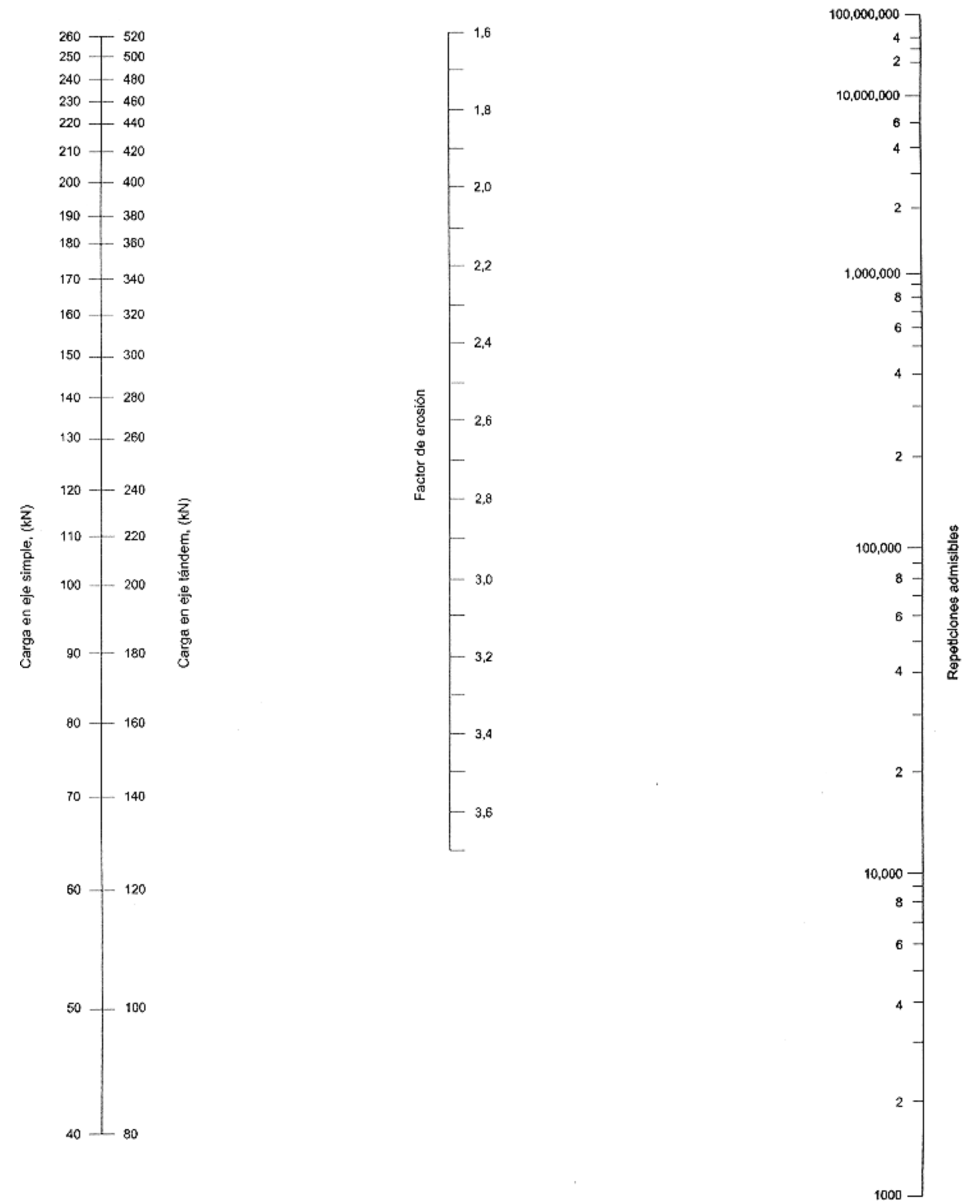


Tabla 7-31
Factor de erosión para ejes sencillos. Pavimentos de concreto hidráulico con dovelas y con hombros de concreto hidráulico

Eje sencillo						
Espesor de losa (mm)	k del conjunto subrasante / subbase					
	20	40	60	80	140	180
100	3.27	3.24	3.22	3.21	3.17	3.15
110	3.16	3.12	3.10	3.09	3.05	3.03
120	3.05	3.01	2.99	2.98	2.94	2.92
130	2.96	2.92	2.89	2.88	2.84	2.82
140	2.87	2.82	2.80	2.78	2.75	2.73
150	2.79	2.74	2.72	2.70	2.67	2.65
160	2.71	2.66	2.64	2.62	2.59	2.57
170	2.64	2.59	2.57	2.55	2.51	2.49
180	2.57	2.52	2.50	2.48	2.44	2.42
190	2.51	2.46	2.43	2.41	2.38	2.36
200	2.45	2.40	2.37	2.35	2.31	2.30
210	2.39	2.34	2.31	2.29	2.26	2.24
220	2.34	2.29	2.26	2.24	2.20	2.18
230	2.29	2.23	2.21	2.19	2.15	2.13
240	2.24	2.18	2.16	2.13	2.10	2.08
250	2.19	2.14	2.11	2.09	2.05	2.03
260	2.15	2.09	2.06	2.04	2.00	1.98
270	2.10	2.05	2.02	2.00	1.96	1.94
280	2.06	2.01	1.98	1.95	1.91	1.89
290	2.02	1.97	1.93	1.91	1.87	1.85
300	1.98	1.93	1.90	1.87	1.83	1.81
310	1.95	1.89	1.86	1.84	1.79	1.77
320	1.91	1.85	1.82	1.80	1.76	1.74
330	1.87	1.82	1.78	1.76	1.72	1.70
340	1.84	1.78	1.75	1.73	1.69	1.67
350	1.81	1.75	1.72	1.69	1.65	1.63

Tabla 7-32
Factor de erosión para ejes tándem. Pavimentos de concreto hidráulico con dovelas y con hombros de concreto hidráulico

Eje tándem						
Espesor de losa (mm)	k del conjunto subrasante / subbase					
	20	40	60	80	140	180
100	3.25	3.17	3.14	3.12	3.11	3.11
110	3.16	3.07	3.03	3.00	2.98	2.97
120	3.08	2.98	2.93	2.90	2.86	2.84
130	3.01	2.90	2.85	2.81	2.76	2.74
140	2.94	2.83	2.77	2.74	2.67	2.65
150	2.88	2.77	2.71	2.67	2.60	2.57
160	2.82	2.71	2.65	2.60	2.53	2.50
170	2.77	2.65	2.59	2.55	2.46	2.43
180	2.72	2.60	2.54	2.49	2.41	2.37
190	2.67	2.56	2.49	2.44	2.35	2.32
200	2.63	2.51	2.44	2.40	2.31	2.27
210	2.58	2.47	2.40	2.35	2.26	2.22
220	2.54	2.43	2.36	2.31	2.22	2.18
230	2.50	2.39	2.32	2.27	2.18	2.13
240	2.46	2.35	2.28	2.23	2.14	2.10
250	2.43	2.31	2.24	2.20	2.10	2.06
260	2.39	2.28	2.21	2.16	2.07	2.02
270	2.36	2.24	2.18	2.13	2.03	1.99
280	2.32	2.21	2.14	2.10	2.00	1.96
290	2.29	2.18	2.11	2.06	1.97	1.93
300	2.26	2.15	2.08	2.03	1.94	1.90
310	2.23	2.12	2.05	2.01	1.91	1.87
320	2.20	2.09	2.03	1.98	1.88	1.84
330	2.17	2.06	2.00	1.95	1.86	1.81
340	2.15	2.04	1.97	1.92	1.83	1.79
350	2.12	2.01	1.95	1.90	1.80	1.76

Tabla 7-33
Factor de erosión para ejes sencillos. Pavimentos de concreto hidráulico sin dovelas y con hombros de concreto hidráulico

Eje sencillo						
Espesor de losa (mm)	k del conjunto subrasante / subbase					
	20	40	60	80	140	180
100	3.45	3.41	3.39	3.38	3.34	3.31
110	3.34	3.30	3.28	3.27	3.23	3.20
120	3.24	3.20	3.18	3.16	3.13	3.11
130	3.15	3.11	3.08	3.07	3.04	3.02
140	3.07	3.02	3.00	2.98	2.95	2.93
150	2.99	2.94	2.92	2.90	2.87	2.85
160	2.91	2.87	2.84	2.83	2.80	2.78
170	2.85	2.80	2.77	2.76	2.73	2.71
180	2.78	2.73	2.71	2.69	2.66	2.64
190	2.73	2.67	2.64	2.63	2.60	2.58
200	2.67	2.61	2.59	2.57	2.54	2.52
210	2.62	2.56	2.53	2.51	2.48	2.47
220	2.57	2.51	2.48	2.46	2.43	2.41
230	2.52	2.46	2.43	2.41	2.38	2.36
240	2.47	2.41	2.38	2.36	2.33	2.31
250	2.43	2.37	2.34	2.32	2.28	2.27
260	2.39	2.33	2.29	2.27	2.24	2.22
270	2.35	2.28	2.25	2.23	2.20	2.18
280	2.31	2.25	2.21	2.19	2.16	2.14
290	2.28	2.21	2.17	2.15	2.12	2.10
300	2.24	2.17	2.14	2.12	2.08	2.06
310	2.21	2.14	2.10	2.08	2.04	2.02
320	2.18	2.11	2.07	2.05	2.01	1.99
330	2.15	2.07	2.04	2.01	1.97	1.95
340	2.12	2.04	2.01	1.98	1.94	1.92
350	2.09	2.01	1.97	1.95	1.91	1.89

Tabla 7-34
Factor de erosión para ejes tándem. Pavimentos de concreto hidráulico sin dovelas y con hombros de concreto Hidráulico

Eje tándem						
Espesor de losa (mm)	k del conjunto subrasante / subbase					
	20	40	60	80	140	180
100	3.45	3.36	3.33	3.31	3.28	3.27
110	3.36	3.27	3.22	3.20	3.16	3.15
120	3.28	3.18	3.13	3.11	3.06	3.04
130	3.21	3.11	3.05	3.02	2.97	2.95
140	3.15	3.01	2.98	2.95	2.89	2.86
150	3.09	2.98	2.92	2.88	2.82	2.79
160	3.04	2.92	2.86	2.82	2.75	2.72
170	2.99	2.87	2.81	2.77	2.69	2.66
180	2.94	2.82	2.76	2.71	2.64	2.61
190	2.90	2.77	2.71	2.67	2.59	2.55
200	2.86	2.73	2.67	2.62	2.54	2.51
210	2.82	2.69	2.63	2.58	2.50	2.46
220	2.78	2.66	2.59	2.54	2.46	2.42
230	2.75	2.62	2.55	2.50	2.42	2.38
240	2.72	2.59	2.52	2.47	2.38	2.34
250	2.69	2.55	2.48	2.43	2.35	2.31
260	2.66	2.52	2.45	2.40	2.31	2.27
270	2.63	2.49	2.42	2.37	2.28	2.24
280	2.60	2.47	2.39	2.34	2.25	2.21
290	2.58	2.44	2.37	2.32	2.22	2.18
300	2.55	2.41	2.34	2.29	2.19	2.15
310	2.53	2.39	2.31	2.26	2.17	2.13
320	2.50	2.36	2.29	2.24	2.14	2.10
330	2.48	2.34	2.27	2.21	2.12	2.07
340	2.46	2.32	2.24	2.19	2.09	2.05
350	2.44	2.30	2.22	2.17	2.07	2.03

7.2.3 Diseño de juntas

Tiene como objetivo principal, el control de la fisuración y agrietamiento natural que sufre el concreto durante el proceso constructivo y de uso.

Además, tiene las siguientes funciones:

- Controla el agrietamiento transversal y longitudinal
- Divide el pavimento en secciones adecuadas para el proceso constructivo
- Permite el movimiento y alabeo de las losas por efecto de las cargas de tránsito
- Permite transferencia de cargas entre losas

El sistema de juntas se diseña teniendo en cuenta las siguientes consideraciones:

i. Condiciones ambientales

ii. Espesor de losa

iii. Sistema de transferencia de carga

iv. Tránsito

v. Características de los materiales

vi. Tipo de subbase

vii. Características del material sellante

viii. Diseño del hombro

Los tipos más comunes de juntas son los siguientes:

- Juntas transversales de construcción
- Juntas transversales de expansión
- Juntas transversales de contracción
- Juntas longitudinales de contracción
- Juntas longitudinales de construcción

a) Juntas transversales de construcción

Para los constructores estas son las juntas principales, porque no es fácil definir donde se parara la obra. Si la junta transversal de construcción se va a realizar en el tercio medio, de una losa de un carril adyacente es necesario que la junta de construcción este dotada de hierros para cocerla evitando con ellos los movimientos relativos y eliminando la posibilidad de que se desarrolle una fisura en la losa adyacente.

El método más común para finalizar las labores de construcción es rematando la obra contra una formaleta de madera que genera una cara lisa, por lo cual es necesario dotar esta junta de pasadores de carga, así en el resto del pavimento la transferencia de cargas se esta haciendo a través de la trabazón de agregados, y por ende la formaleta tiene que estar dotada de agujeros que permitan insertar las dovelas

La formaleta se deja en su sitio hasta el momento de reiniciar las obras cuando se remueve. También se puede hacer una junta de construcción cortando el concreto, en cuyo caso se extiende el concreto pasando por el sitio en que debe quedar la junta, y luego con la ayuda de sierras se corta y se remueve el concreto que este más allá del sitio de la junta de construcción.

Para alcanzar un buen resultado con el corte del concreto es necesario que las ultimas tandas de concreto desarrollen más rápido la resistencia inicial. Al igual que con las juntas de construcción formaleteadas, es necesario poner dovelas, por lo que en este caso se necesita perforar agujeros para instalarlas.

Las juntas transversales de construcción no necesitan el corte inicial para debilitar la sección, solo es necesario hacer el corte secundario para conformar la caja en la que se aloja el material de sello.

b) Juntas transversales de expansión

b.1) Juntas con dovelas

En las juntas transversales de expansión a uno de los extremos de las dovelas se les monta una cápsula de 50 mm de longitud, que permita absorber los movimientos de expansión de las losas, dicha cápsula se debe dotar con sistema que impida que se caiga, o se salga de la dovela durante la colocación.

Las condiciones que se le piden a las dovelas en las juntas de expansión, en cuanto al alineamiento y a la lubricación, son las mismas que las pedidas en las juntas transversales de contracción.

Dado que las juntas de expansión son más anchas que las de contracción a la canastilla en la que se van a fijar las dovelas de estas juntas, se le dota de un material de sello preformado y compresible con una altura idéntica a la losa de concreto.

b.2) Junta sin dovelas

La característica de las juntas de expansión sin dovelas es que el espesor de la losa se incrementa para reducir los esfuerzos de borde. El incremento del espesor es del orden de un 20% y la transición se desarrolla suavemente en una longitud de 6 a 10 veces el espesor de la losa.

c) Junta Transversal de contracción

Son las juntas que se generan al final del día o cuando se suspende la colocación del concreto. Estas juntas se deben localizar y construir en el lugar planeado siempre que sea necesario. Si es posible se hará coincidir las juntas de construcción con una de contracción, si no, se hará en el tercio medio de la placa. Siempre se deben construir perpendicularmente al centro de la vía aún cuando las de contracción tenga esviaje.

d) Junta longitudinal de contracción

Las juntas longitudinales, cuando el pavimento se construye con un ancho de dos o más carriles, se cortan de manera similar a las juntas transversales de contracción, solo que el momento del corte no es tan critico, pero se deben cortar rápidamente si la subbase es estabilizada, apenas se corten las juntas transversales. En cuanto a las barras de anclaje, los equipos de formaletas deslizantes tienen dispositivos para insertarlas.

Por el poco movimiento que tienen estas juntas no necesita de una caja para el sello, basta hacer un corte de 3 a 6 mm de ancho, con una profundidad igual a la tercera parte del espesor de la losa. Sin embargo, si se pide la caja para el sello, esta se puede hacer con un equipo multidisco que corta a la profundidad y anchos deseados.

Con el fin de optimizar el costo de los selladores de las juntas, en las longitudinales se puede utilizar un sellador diferente como consecuencia de los menores movimientos de estas juntas

e) Junta longitudinal de construcción

En estas juntas hay dos aspectos para tener en cuenta, la inserción de las barras de anclaje y el sellado de las juntas. Respecto a la inserción de las barras de anclaje esto se puede hacer introduciendo, en el concreto fresco, las barras dobladas en un ángulo de 90°, perforando agujeros en las losas y luego meter las barras en ellos y asegurarlas con un mortero epóxico para que puedan cumplir con su función, que es anclar las losas.

Cuando se opta por insertar las barras dobladas en un ángulo de 90° se debe preferir el acero de 40,000 psi al de 60,000 psi ya que toleran mejor las deformaciones.

Las juntas longitudinales de construcción necesitan una caja para el sello, muy ancha para poder acomodar las variaciones longitudinales, en el borde de las losas, generadas por el proceso constructivo, pero el corte y el sellado son similares al de las juntas longitudinales de contracción.

En las siguientes tablas se presentan resúmenes de las especificaciones para la colocación de juntas y dovelas.

Tabla 7-35
Resumen de especificaciones para colocación de juntas

Espesor de losa (cm)	1	2	3	4
	Espaciamiento entre juntas (cm)	**Profundidad de corte de juntas (cm)**	**Profundidad del material de sellado (cm)**	**Ancho del corte para la junta (cm)**
15	360	5.00	1.00	0.50
16	384	5.33	1.07	0.53
17	408	5.67	1.13	0.57
18	432	6.00	1.20	0.60
19	456	6.33	1.27	0.63
20	480	6.67	1.33	0.67
21	504	7.00	1.40	0.70
22	528	7.33	1.47	0.73
23	552	7.67	1.53	0.77
24	576	8.00	1.60	0.80
25	600	8.33	1.67	0.83
26	624	8.67	1.73	0.87
27	648	9.00	1.80	0.90
28	672	9.33	1.87	0.93
29	696	9.67	1.93	0.97
30	720	10.00	2.00	1.00
31	744	10.33	2.07	1.03
32	768	10.67	2.13	1.07
33	792	11.00	2.20	1.10
34	816	11.33	2.27	1.13
35	840	11.67	2.33	1.17

Columna 1: El espaciamiento entre juntas, es 24 veces el espesor de la losa, en centímetros

Columna 2: La profundidad del corte de la junta, es 1/3 del espesor de la losa, en centímetros.

Columna 3: La profundidad del material de sellado, es 1/5 de la profundidad de la junta, en centímetros

Columna 4: Al ancho del corte de la junta es 1/10 de la profundidad de la junta, en centímetros

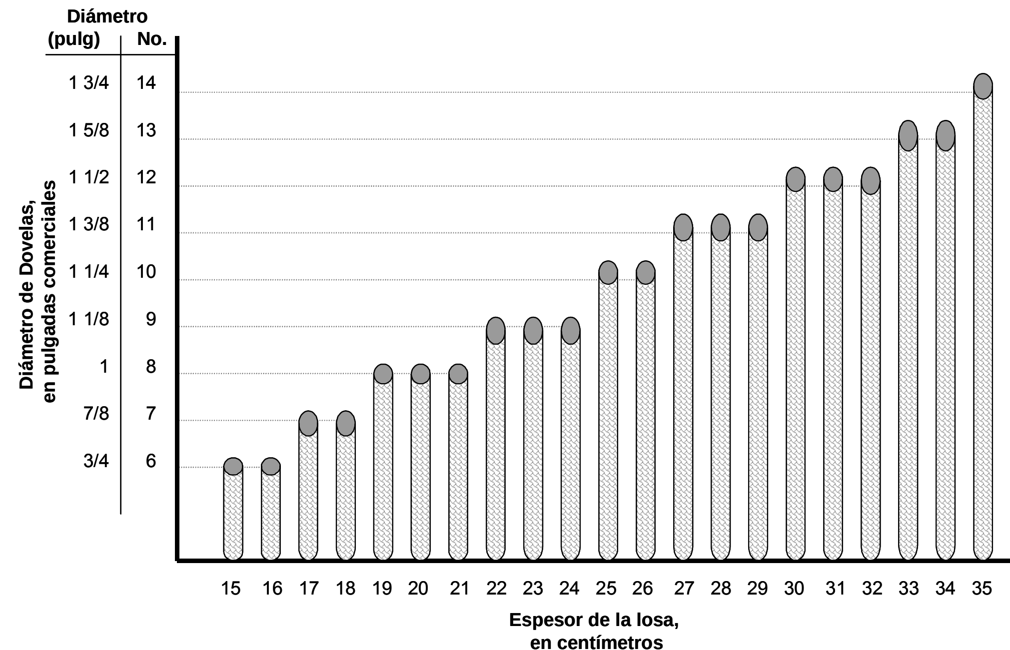
Tabla 7-36
Resumen de especificaciones para colocación de dovelas

Espesor de losa (cm)	1	2	3	4	5
	Diámetro de Dovelas cm (plg)	**Largo de Dovelas (cm)**	**Diámetro comercial de dovela (plg)**	**Profundidad de dovelas (cm)**	**Separación entre dovelas (cm)**
15	1.88 (0.74)	28	3/4	7.50	30.00
16	2.01 (0.79)	29	3/4	8.00	30.00
17	2.13 (0.84)	31	7/8	8.50	30.00
18	2.26 (0.89)	32	7/8	9.00	30.00
19	2.39 (0.94)	34	1	9.50	30.00
20	2.49 (0.98)	35	1	10.00	30.00
21	2.62 (1.03)	37	1	10.50	30.00
22	2.74(1.08)	38	1 1/8	11.00	30.00
23	2.87 (1.13)	40	1 1/8	11.50	30.00
24	3.00 (1.18)	41	1 1/8	12.00	30.00
25	3.12 (1.23)	43	1 1/4	12.50	30.00
26	3.25 (1.28)	44	1 1/4	13.00	30.00
27	3.38 (1.33)	46	1 3/8	13.50	30.00
28	3.51(1.38)	47	1 3/8	14.00	30.00
29	3.63 (1.43)	49	1 3/8	14.50	30.00
30	3.76 (1.48)	50	1 1/2	15.00	30.00
31	3.89 (1.53)	52	1 1/2	15.50	30.00
32	3.99 (1.57)	53	1 1/2	16.00	30.00
33	4.11 (1.62)	55	1 5/8	16.50	30.00
34	4.24 (1.67)	56	1 5/8	17.00	30.00
35	4.37 (1.72)	58	1 3/4	17.50	30.00

Columna 1: El diámetro de la dovela , es de 1/8 del espesor de la losa, en pulgadas
Columna 2: Largo de dovelas es igual a 12 veces su diámetro más 5 centímetros
Columna 3: Diámetro de la dovela convertido a Diámetro comercial, en pulgadas
Columna 4: La profundidad de instalación de la dovela es 1/2 del espesor de la losa, en centímetros
Columna 5: La separación recomendable entre dovelas, en centímetros

En la Figura 7-36 se relacionan los datos obtenidos en la Tabla 7-38, respecto al diámetro comercial de la dovela (columna 3) con el espesor de la losa.

Figura 7-38
Detalle de diámetros comerciales de dovelas, respecto al espesor de losa



7.2.3.1 Selladores de juntas

Su propósito es minimizar la filtración de agua superficial dentro de las juntas y las capas subyacentes. Así como , la entrada de materiales incompresibles que puedan ocasionar desportillamientos y daños mayores. Este proceso consiste en el aserrado de la losa, entre 2 y 4 horas después de su colocación, en los diámetros indicados en la Figura 7-38. Posteriormente se coloca el cordón de respaldo y sobre el mismo, el material sellador. En la tabla 7- 37 se muestran los distintos tipos de selladores utilizados en Centroamérica.

Los materiales de relleno y selladores para juntas deben ajustarse a las normas AASHTO y cumplir con lo indicado en la tabla 7-37:

Tabla 7-37
Materiales más comunes para sellado de juntas

Tipo de Sellador	Especificación
Selladores aplicados en caliente	
Asfalto polimérico	AASHTO M-173
Sellador polimérico	AASHTO M-301
Sellador elastomérico	AASHTO M-282
Sellos premoldeados	
Sellos de compresión	AASHTO M-220
Material de relleno	
Material de relleno premoldeado de fibra	AASHTO M-213
Material de relleno hule-espuma	AASHTO M-213
Material de relleno bituminoso	AASHTO M-33

Fuente: Diseño, Construcción y Mantenimiento de pavimentos de concreto, Londoño, Cipriano, 2,001

De utilizar un ligante de polímero y agregado fino, debe ser en las proporciones recomendadas por el fabricante y debe tener una resistencia a la compresión mínima de 25 MPa (3,625 psi) en 4 horas.

7.3 Adoquines

Para el diseño de espesores en adoquines, descritos en este manual, se usarán cuatro tipos de métodos, los cuales son los siguientes:

- Método de Murillo López de Souza
- Método Argentino
- Método de AASHTO.
- Método Británico

7.3.1 Método de Murillo López de Souza.

Método utilizado en caminos rurales con un tipo de tránsito medio (menos del 750 vehículos comerciales por día con 20% de carga máxima), una carga por rueda de 5 toneladas y un C.B.R. de la subrasante del 5% mínimo.

Espesores requeridos, bajo esas condiciones sobre un terreno natural con un CBR de 5% o mayor, debe ser de 45 a 55 centímetros, de acuerdo a lo indicado en la siguiente tabla:

Tabla 7-38
Composición del Pavimento de adoquín

Estructura de Pavimento (cm)	**Precipitación pluvial (mm/año)**		
	=< 800	800 a 1500	>= 1500
Adoquín	10	10	10
Capa de arena*	3 – 5	3 - 5	3 - 5
Base	20	20	20
Subbase	12	16	20
TOTAL	**42**	**46**	**50**

* La capa de arena se considera que no aporta soporte estructural.
Fuente: Diseño de Espesores y recomendaciones generales para la construcción de nuevos pavimentos utilizando adoquines, Frederic Harris, Nicaragua, 2,002.

Para subrasantes con CBR menores a 5% debe colocarse un espesor de terracería mejorada, por debajo de la estructura de pavimento anteriormente indicada, con espesores de 10 a 45 cm; dependiendo del valor del C.B.R. y de la precipitación pluvial de la zona en donde se ubique el pavimento a construir.

En el anexo de este reporte se incluye tabla de Diseño de Espesores de Pavimento Flexible para Carga Máxima por Rueda de 5 Toneladas.

7.3.2 Método Argentino[6].

Otro Método con el que se obtienen espesores similares es el desarrollado, en base a experiencias del Instituto de Cemento Portland Argentino, por el Ing. Juan F. García Balado, para el cálculo de espesores de pavimento de Adoquines, quien ha propuesto la siguiente ecuación:

$$e = \frac{100 + \sqrt{P}}{C.B.R. + 5}$$

donde:

e = Espesor total del pavimento requerido, en cm.
P = Carga por rueda, en toneladas
C.B.R. = El de la Subrasante en condiciones de servicio

Si se emplea la ecuación considerando:

C.B.R. de la Subrasante = 5%
Carga por Rueda = 5 Toneladas
Se obtiene:

$$e = \frac{100 + \sqrt{5}}{5 + 5}$$

e = 43.5 ; equivale a 44 cm

Como puede observarse este valor es similar al obtenido con el Método de Murillo López de Souza.

El Método Argentino contempla, además, la utilización de factores de equivalencia, para las diferentes capas del pavimento, en función de los tipos de materiales que se utilizan para su conformación. Dichos factores se describen a continuación:

[6] Juan F. García Balado

Tabla 7-39
Factores de Equivalencia

TIPO DE MATERIAL	FACTOR DE EQUIVALENCIA
Base de Suelo Granular	1.0
Suelo-Cemento	1.5 a 2.0
Adoquín	2.0 a 2.5

Fuente: Diseño de Espesores y recomendaciones generales para la construcción de nuevos pavimentos utilizando adoquines, Frederic Harris, Nicaragua, 2,002.

Si se toman en cuenta estos factores de equivalencia el espesor quedaría conformado de la manera siguiente:

$$e = k_1e_1 + k_2e_2$$

donde:

e = Espesor total del pavimento
e_1 = Espesor del Adoquín
e_2 = Espesor de la Base
k_1 = Factor de Equivalencia del Adoquín
k_2 = Factor de Equivalencia de Base de Suelo Granular

Si se tiene que

$e = 44$ cm
$e_1 = 10$ cm (Espesor del Adoquín)
$k_1 = 2.0$ (Factor de Equivalencia del Adoquín)
$k_2 = 1.0$

entonces

$44 = 2(10) + 1(e_2)$
$e_2 = 44 – 20 = 24$
$e_2 = 24$ cm (Base de Suelo Granular)

Si se utiliza Base de Suelo-Cemento, entonces

$e_2 = 24/1.5 = 16$
$e_2 = 16$ cm (Base de Suelo-Cemento)

El espesor quedaría conformado por

Adoquín = 10 cm
Arena = 3 a 5 cm
Base Granular = 24 cm

En el caso de utilizar Base de Suelo Cemento

Adoquín = 10 cm
Arena = 3 a 5 cm
Base Suelo-Cemento = 16 cm

Así mismo, el Método, considera cargas "P" con frecuencia de hasta 10^6 repeticiones. Para valores mayores, el espesor obtenido debe incrementarse de un 25 a un 35%, conforme el detalle siguiente:

Tabla 7-40
Tabla de Espesores a incrementarse, según cargas P

Repeticiones de carga	Espesor a utilizar
hasta 10^6	e
10^6 a 10^7	1.25 e
mayor de 10^7	1.35 e

Fuente: Diseño de Espesores y recomendaciones generales para la construcción de nuevos pavimentos utilizando adoquines, Frederic Harris, Nicaragua, 2,002.

Si se considera que el camino soportará, 1.5 millones de ejes estándar, entonces, los espesores anteriormente obtenidos deben incrementarse en un 25%, por lo que estos quedarían de la manera siguiente:

Adoquín = 10 cm
Arena = 3 a 5 cm
Base Granular =30 cm

En el caso de utilizar Base de Suelo Cemento

Adoquín = 10 cm
Arena = 3 a 5 cm
Base Suelo-Cemento = 20 cm

7.3.3 Método AASHTO

En este método, para el cálculo de los espesores, se utilizó la Guía de Diseño AASHTO 1993.

DATOS DE DISEÑO **AASHTO 1993**

1)	Índice de Confianza (%):	85	75 – 95
2)	Índice de Servicio Inicial:	4.2	4.2-4.4
3)	Índice de Servicio Final:	2.2	2.0-2.5
4)	Índice de Servicio de Diseño:	2.0	-
5)	Desviación Estándar, So:	0.45	0.45
6)	CBR de Subrasante (%):	5.0	-
7)	Módulo de Resiliencia, Mr.: (CBR x 1500)	7500	-
8)	Período de Diseño (Años):	15	-
9)	Número de Ejes Equivalentes:	1.5 millones	-

NUMERO ESTRUCTURAL

$$SN = 3.4$$

CALCULO DE ESPESORES

$$SN = a_1D_1 + a_2D_2$$

donde:

SN: Número Estructural	=	3.4
a_1 : Coeficiente de Carpeta (Adoquín)	=	0.45
a_2 : Coeficiente de Base	=	0.14
D_1: Espesor del Adoquín	=	
D_2: Espesor de la Base	=	

Si el espesor del Adoquín es de 10 cm,

entonces:

$3.4 = 0.45\underline{(10)} + 0.14(D_2)$

2.54

$D_2 = \frac{3.4 - 1.7716}{0.14} = 11.63$ pulgadas

$D_2 = 29.52$ cm

$D_2 \approx 30$ cm

En base a lo anterior la estructura de pavimento quedaría conformada de la manera siguiente:

Adoquín = 10 cm
Arena = 3 a 5 cm
Base Granular =30 cm

En el caso de utilizar Base de Suelo Cemento

Adoquín = 10 cm
Arena = 3 a 5 cm
Base Suelo-Cemento = 20 cm

7.3.4 Método Británico[7]

La publicación "Adoquines de Concreto" del Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto (IMCYC)[8] demostró en su informe técnico " The design of concrete block roads", Wexham Springs, Cement and Association, 1976; que los Adoquines colocados sobre un lecho de arena de 5 cm tienen una capacidad de distribución de carga, similar a la del asfalto compactado de 16 cm de espesor. Así mismo señala que la pavimentación con Adoquines de Concreto se puede colocar directamente sobre una Subbase de acuerdo a las Normas de las Road Note 29, "A guide to the estructural design of paviments for new roads" tercera edición, publicada por Transport and Road Research Laboratory, Londres, H. M. Stationery Office, 1970; donde la Base y la

[7] Cement and Concrete Association
[8] páginas 28 y 79, J. Knapton

Superficie de Rodamiento se sustituyen con los Adoquines y 5 cm de arena.
Ahora bien si esto se toma como base para el diseño, es posible utilizar las Road Note 29, para determinar el espesor de la Sub-Base, para cualquier Subrasante y la duración esperada para diversos caminos, que soporten hasta 1.5 millones de ejes estándar. Por otra parte dichas Road Note 29, recomiendan que el espesor total de la construcción sobre el nivel de la terracería no sea menor de 45 cm.

Los materiales para Subbase, que contemplan las Road Note 29, deben cumplir las Normas Británicas, excepto aquellos que se especifican en las Normas 803, 805, 806, 807 y 815, de las “Specification for and bridge works” Departament of Transport, Scottish Development Departament and Welsh Office, 1976, ya que pueden ser susceptibles a la humedad, la cual penetrará entre las juntas de los Adoquines recién colocados.

Cabe hacer notar que el “Technical Memorandum, Núm. H6/78”, del Departamento de Transporte, recomienda que cuando el valor del CBR de la subrasante sea menor al 5%, es necesaria una capa adicional, y ésta debe tener un valor CBR de, por lo menos, 5% más que el de la subrasante (Publicación IMCYC, página 76).

Como puede observarse los cuatro Métodos de Diseño, anteriormente indicados, consideran que el espesor total de un pavimento de Adoquines, colocado sobre una subrasante con CBR de 5%, mínimo, es del orden de 40 a 45 cm.

El espesor anteriormente indicado puede soportar, según las normas británicas, hasta 1.5 millones de ejes estándar.

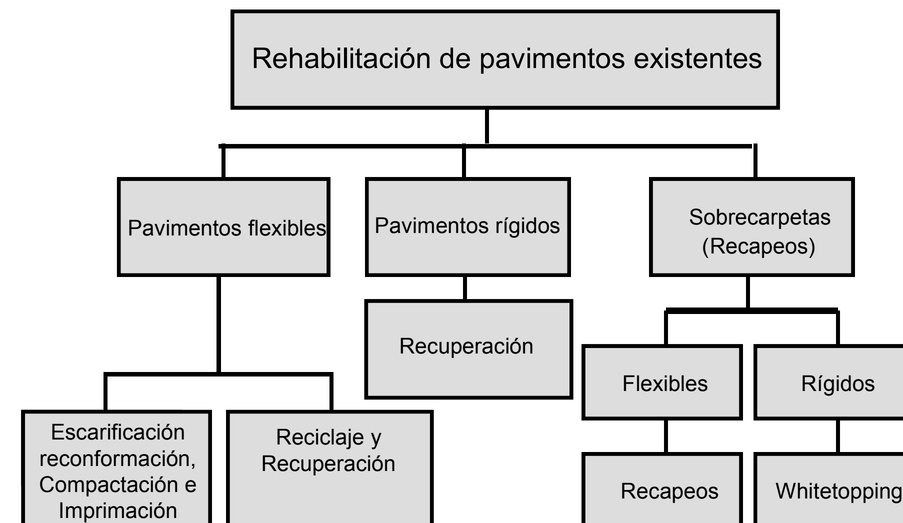
CAPÍTULO 8

REHABILITACIÓN DE PAVIMENTOS EXISTENTES

Es el proceso por medio del cual la estructura de pavimento, es restaurada a su condición original de soporte. Se obtiene de la recuperación con o sin estabilización, del pavimento existente en combinación con material de aporte si es necesario.

En este proceso, los materiales provenientes de los pavimentos existentes, formarán parte de la nueva estructura.

Figura 8-1
Tipos de rehabilitaciones



8.1 Pavimentos flexibles

La rehabilitación de pavimentos flexibles se efectúa por medio de los procedimientos siguientes:

8.1.1 Escarificación, reconformación, compactación e imprimación

Este trabajo debe ser ejecutado en aquellos tramos en que el estado de deterioro del pavimento existente, sea tal que impida la reparación aislada de las áreas afectadas y consistirá en la escarificación, desintegración, humedecimiento, mezclado, reconformado, compactado y afinado del material constitutivo de la carpeta asfáltica o del tratamiento asfáltico del pavimento original de la carretera; el trabajo descrito, debe hacerse de modo tal, que la capa escarificada llegue a mezclarse con el material de base presente en la estructura de pavimento y/o con el material de base que pudiera agregarse con fines de reforzar la estructura. Esta mezcla se usará como nueva capa de base. .

Como el pavimento existente se debe escarificar y pulverizar, el material obtenido en estas operaciones, debe reducirse a un tamaño máximo de 1½ pulgadas, el cual será incorporado nuevamente a la estructura.

El material de base a incorporar deberá cumplir con los requisitos previstos en el Capítulo 5, numeral 5.2.3.

El material asfáltico y de base escarificados, pulverizados, mezclados y conformados, se compactarán al 100% de la densidad seca máxima correspondiente al ensayo AASHTO T-180 (Próctor Modificado.)

La humedad de compactación no debe variar en ±2% de la respectiva humedad óptima.

Este trabajo es necesario realizarlo básicamente cuando el estado superficial de la carretera presente un fuerte deterioro (grietas, ahuellamiento, pérdida de finos, desprendimiento de la capa de rodadura, etc.) que incluya baches en la base, sin que exista falla estructural; esto quiere decir, que el IRI tendrá un valor de 4 ó más y el índice de serviciabilidad es menor de 2.5.

Se incluye en la escarificación, homogenización, reconformación y compactación el material existente de base, con el objeto de que esa parte se integre a la nueva estructura de pavimento y la carretera nuevamente cumpla su función de dar confort al usuario.

En algunos casos es necesario aportar material adicional de base, con el objeto de reponer el que se haya perdido por el deterioro ó con el fin específico de incrementar la capacidad soporte de la estructura, por el hecho de haberse incrementado sustancialmente el tránsito.

Esto permitirá también que al colocar la nueva capa de rodadura no hay reflejo de grietas.

8.1.2 Reciclaje y recuperación

Este trabajo consiste en pulverizar la superficie bituminosa del lugar o solo la base granular o las dos capas en conjunto, llegando a la profundidad que incluyan dichos espesores, luego inyectando y mezclando ligante y/o agua, con el material pulverizado, para después homogenizarlo, conformarlo y compactarlo; esta mezcla se usará como capa de base de la estructura, aportándole material de base si fuera necesario.

Al comenzar las operaciones de reciclaje y recuperación, el ligante debe ser aplicado al material pulverizado, en los porcentajes iniciales suministrados por el laboratorio, basados en muestras obtenidas antes de la construcción. Todo el material debe ser pulverizado hasta 100% pasa tamiz de 2”. La cantidad de aplicación del ligante será determinada conforme el diseño. Una tolerancia de +/- 0.5% del rango de aplicación designados, debe mantenerse siempre.

El material reciclado y recuperado, debe ser compactado en el laboratorio, de acuerdo con AASHTO T-245. La frecuencia de la prueba de densidad debe ser de una por cada 5,000 metros cuadrados. Se debe realizar la prueba AASHTO T-245 para los cálculos del porcentaje relativo de compactación en cada densidad de campo tomada.

Después que el material reciclado y recuperado ha sido compactado, se le debe aplicar un sello de emulsión a la superficie, en un rango de aproximadamente 0.11 a 0.45 lt/m² antes de abrir al tránsito; no debe permitirse transitar sobre el material reciclado antes de 24 horas.

a) Materiales

El material de aporte deberá cumplir con lo establecido en la sección 5.2.3.1, incluyendo las referencias de AASHTO T-93, T-180, T-96, T-146, T-176, T-89, T-11 y T-27.

Los materiales obtenidos del reciclado y recuperación del pavimento existente, en su estado original o combinados con material de aporte, deben cumplir con lo establecido en la sección 5.2.3.2 de este manual.

Los productos estabilizadores deben cumplir con los requerimientos establecido en la sección 5.2.3.2 de este manual.

El ligante a usarse en el procedimiento de reciclaje y recuperación, debe ser una emulsión asfáltica que cumpla los requerimientos normales del tipo CSS-1 ó similar.

La mezcla asfáltica reciclada y recuperada en frío, debe cumplir con la granulometría determinada por los ensayos de laboratorio del material existente en sitio con el de aporte.

La emulsión para imprimación de la superficie reciclada y recuperada, debe ser emulsión asfáltica CSS-1 o similar. La emulsión asfáltica CSS-1 debe cumplir la especificación AASHTO M- 208 y según los ensayos AASHTO T-59.

Para realizar este reciclaje y recuperación, se debe dimensionar y graduar el material de aporte y combinarlo en forma homogénea con los productos estabilizadores y con el material reciclado y recuperado. La mezcla debe cumplir con los requisitos indicados en la sección 5.2.3.2.

El agua debe llenar los requisitos de la norma AASHTO T-26. Si la fuente es un sistema de abastecimiento de agua potable, puede ser utilizada sin necesidad de ensayo previo.

Este tipo de trabajo es necesario efectuarlo cuando el estado completo de la carretera presente un deterioro muy avanzado (grietas, ahuellamiento, pérdida de finos, desprendimiento de la capa de rodadura, deformaciones, hundimientos, etc.) que incluya baches severos en la base y que exista falla estructural; esto quiere decir, que el IRI tendrá un valor de 6 ó más y el índice de serviciabilidad es mucho menor de 2.

Se incluye en el reciclaje y recuperación el material existente de base, con el objeto de que esa parte se integre a la nueva estructura de pavimento y la carretera nuevamente cumpla su función de dar confort al usuario.

En estos casos es necesario aportar material de base, con el objeto de reponer el que se haya perdido por el deterioro ó con el fin de incrementar la capacidad soporte de la estructura, por el hecho de haberse incrementado el tránsito.

El adicionarle productos estabilizadores, incrementar el espesor de la capa de base y dejarla como superficie para la colocación de una nueva capa de rodadura a la cual no se le reflejaran las grietas, y también no solo es objeto de mejorar el índice de serviciabilidad y el IRI de la carretera, sino alargar el período de diseño y el de la vida útil.

8.2 Pavimentos rígidos

8.2.1 Recuperación

Es la rehabilitación de un pavimento de concreto hidráulico existente, que ha sufrido diferentes tipos de fallas. Consiste en el fresado de la superficie con discos de diamante, la reparación de las áreas afectadas de la losa, la reparación de juntas, la reparación de grietas, el sellado inferior y estabilización de losas, la colocación de dovelas en las juntas, la remoción del pavimento y nivelación de losas, el fracturado y aplanado de las losas, antes de la colocación de una sobrecapa en el pavimento existente.

a) Materiales

Los agregados pulverizados para subbase, deben tener las características indicadas en el Capítulo 5, sección 5.2.2 de este Manual.

Los adhesivos de resina epóxica que se utilicen, deben cumplir con los requisitos de la norma AASHTO M 235.

Los materiales de relleno y selladores para juntas deben ajustarse a las normas AASHTO y cumplir con lo especificado en la tabla 8-1:

Tabla 8-1
Materiales más comunes para sellado de juntas

Tipo de Sellador	Especificación
Selladores aplicados en caliente	
Asfalto polimérico	AASHTO M-173
Sellador polimérico	AASHTO M-301
Sellador elastomérico	AASHTO M-282
Sellos premoldeados	
Sellos de compresión	AASHTO M-220
Material de relleno	
Material de relleno premoldeado de fibra	AASHTO M-213
Material de relleno hule-espuma	AASHTO M-213
Material de relleno bituminoso	AASHTO M-33

Ref. Asociación del Cemento Portland

De utilizar un ligante de polímero y agregado fino, debe ser en las proporciones recomendadas por el fabricante y debe tener una resistencia a la compresión mínima de 25 MPa (3,625 psi) en 4 horas.

El cemento a utilizar debe tener, un color similar al del concreto existente. Asimismo, los agregados deben tener una graduación, color y dureza similares a la de los agregados existentes en el pavimento.

b) Procedimientos de ejecución

Para la rehabilitación de pavimentos de concreto hidráulico, se describen en el Manual Centroamericano de Especificaciones para la Construcción de Carreteras y Puentes Regionales, SIECA, año 2,001.

En pavimentos de concreto hidráulico, cuando el estado de deterioro de la superficie, losas, subbase ó de las juntas, presentan grietas, falta de sellador, escalonamiento, etc. y las condiciones de transitabilidad son molestas para el usuario, entonces se hace necesario efectuar una reparación para volverlo a su estado original.

Como la demolición total de un pavimento de concreto es una operación de un valor muy alto, que equivale a la construcción de una nueva carretera y si la disponibilidad económica no es suficiente, entonces se hace necesario recuperar la estructura.

Para comenzar, se cambiarían las losas colapsadas ó sea las que prácticamente sea imposible su reparación, operación que incluye el cambio ó reposición de dovelas, posteriormente se renovaría el sello de las juntas ó reponer las que ya no existan. Cuando las losas presentan ahuellamiento o escalonamiento, se deben fresar a la profundidad necesaria para eliminarlo.

Cuando por efecto de la falta de sellador en las juntas haya penetrado agua bajo las losas y exista bombeo de finos y las mismas no presenten grietas ó fisuras de mayor importancia, es pertinente efectuar inyecciones de concreto para reponer la sustentación del soporte. En las losas que presenten grietas, sin existir hundimientos, es conveniente aserrarlas y colocarles sellador como una junta normal.

Si las condiciones del volumen de tránsito, son aceptables por el período de diseño de la carretera, una recuperación de esta naturaleza permitiría prolongar la vida útil de la misma, pero si la cantidad de vehículos se ha incrementado es recomendable colocar una capa adicional en la estructura.

8.3 Sobrecarpetas (recapeos)

Consiste en la colocación de una sobrecarpeta de mezcla asfáltica en frío, concreto asfáltico en caliente o concreto hidráulico, sobre una capa bituminosa de rodadura existente, la cual tiene un alto grado de deterioro que impide realizar sobre la misma, labores de mantenimiento rutinario.

Este tipo de trabajo es conveniente cuando las condiciones de la carretera no han llegado a los límites permisibles de deterioro y además se hace necesario incrementar la estructura por efecto del aumento del tránsito.

Se debe considerar la realización de algunos trabajos preliminares antes de la colocación de la sobrecarpeta, tales como:

- Bacheo en los sitios donde se considere apropiado restablecer las características de soporte de los pavimentos.

- Capa de nivelación superficial para mantener los espesores de la misma capa de rodadura constante.

- Fresado de la carpeta de rodadura, cuanto se considere necesario por las altas irregularidades de la superficie, que no puedan ser corregidas con la capa de nivelación.

8.3.1 Recapeo en pavimentos flexibles

Las sobrecarpetas o recapeos, consisten en la colocación de mezcla asfáltica en frío ó concreto asfáltico en caliente, en espesor no menor de 5 centímetros, sobre la capa de rodadura existente (exceptuando en adoquines), a fin de rehabilitar zonas con problemas de muchos baches o con superficies con daños severos. Este espesor corresponde a la mezcla debidamente compactada.

Esta actividad estará en función de los resultados de deflexiones en los pavimentos existentes.

Como una condición indispensable para la ejecución de esta actividad, se requiere que en el tramo a colocar el concreto asfáltico en caliente, haya deflexiones mayores a las permisibles en el pavimento, debiendo realizar este control por medio de la Viga Benkelman método AASHTO T-256, ó por la aplicación de otro método técnico, reconocido y aceptado profesionalmente.

El valor máximo de dicha deflexión respecto a un punto dado, a una distancia no mayor de 3.68 metros en cualquier dirección, para la capa de superficie de concreto asfáltico será el especificado en la tabla 8-2. Previo a su ejecución se debe efectuar una prueba de campo para determinar la deflexión, por cada 400 metros cuadrados, en la superficie de la capa de concreto asfáltico compactada, previamente a su ejecución.

Tabla 8-2
Deflexiones Máximas Permisibles

Ejes equivalentes en el carril de diseño ESAL´s	Deflexión Permisible
$< 5.0 \times 10^6$	0.60 mm (0.024 pulgada)
$< 10.0 \times 10^6$	0.50 mm (0.020 pulgada)
$< 30.0 \times 10^6$	0.40 mm (0.015 pulgada)
$< 50.0 \times 10^6$	0.35 mm (0.014 pulgada)

Fuente: Especificaciones Generales para la Construcción de Carreteras y Puentes, de la Dirección General de Caminos, Guatemala, 2,000.

Otros defectos deben ser corregidos, siempre y cuando sobrepasen los límites indicados en la tabla 8-3.

Tabla 8-3
Fallas y reparación propuesta

Tipo de falla	Reparación requerida
Ahuellamiento menor a 5 centímetros	Ninguna
Ahuellamiento mayor a 5 centímetros	Fresado o nivelación
Desplazamiento	Fresado
Baches	Rellenar
Falla de subrasante	Retirar y reemplazar
Piel de cocodrilo	Ninguna
Falla de bloque	Ninguna
Grietas transversales	Ninguna
Grietas longitudinales	Ninguna
Exudación	Ninguna
Degradación superficial	Ninguna

Fuente: Manual Centroamericano de Especificaciones para la construcción de Carreteras y Puentes Regionales, SIECA, 2,001.

a) Materiales

La calidad de los materiales a emplearse en la fabricación de la mezcla asfáltica en frío y del concreto asfáltico en caliente, deben cumplir con lo descrito en el capitulo 5, numeral 5.2.4.2 de este Manual.

8.3.2 Whitetopping

El whitetopping, son losas de concreto hidráulico colocadas sobre pavimentos asfálticos existentes.

El fin primordial es la rehabilitación de los pavimentos asfálticos deteriorados, incorporándole como superficie de rodadura una sobrecarpeta de concreto hidráulico y tomando como estructura de soporte el pavimento asfáltico existente en el lugar.

Esta sobrecarpeta ofrece una superficie más sólida y mejora las características de drenaje al eliminar defectos del pavimento asfáltico tales como ahuellamientos y desplazamientos, produciendo una superficie segura y durable.

Las sobrecarpetas de concreto evitan los posibles problemas de construcción que suceden en algunos sitios donde se tienen valores de subrasantes muy pobres, o en subrasantes saturadas. Además permite la construcción directamente sobre la superficie del pavimento flexible sin tener que retirar o reparar la subbase o la subrasante a lo largo de la carretera.

Para mantener los niveles de la rasante de la sobrecarpeta en las transiciones, antes de los puentes y en las estructuras de la carretera, es necesario ajustar la estructura de pavimento hasta su nivel apropiado.

8.4 Diseño de recapeos por el método de AASHTO

Los métodos de rehabilitación de pavimentos por colocación de una sobrecapa o recapeo sobre la estructura existente son muy variados, en función del tipo y deterioro de la estructura y superficie existente y se tienen los siguientes casos:

- AC sobre pavimento de AC
- AC sobre pavimento fracturado de PCC
- AC sobre JPCP, JRCP o CRCP
- AC sobre AC/JPCP, AC/JRCP o AC/CRCP
- PCC con pasadores sobre pavimento PCC
- PCC sin pasadores sobre pavimento PCC
- PCC sobre pavimento de AC

En donde:

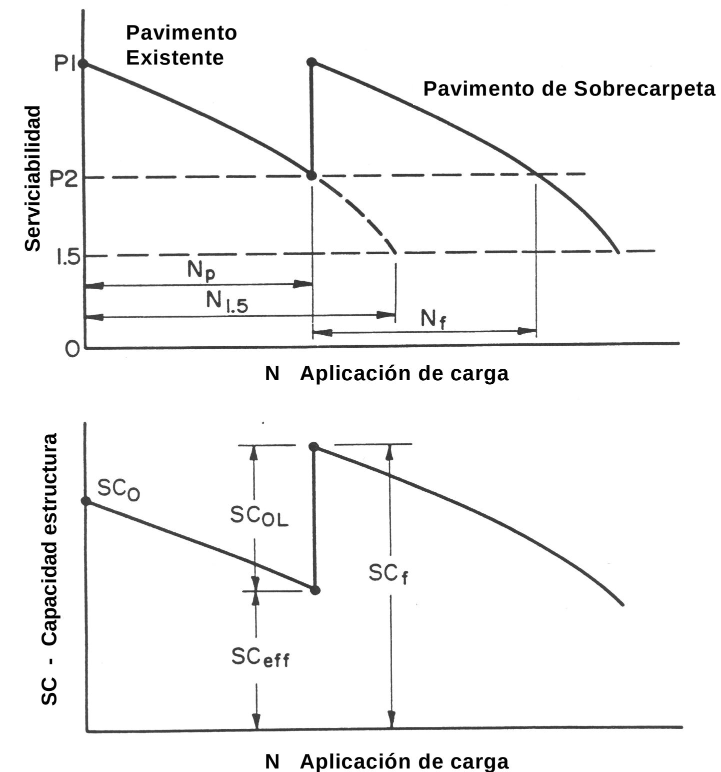
AC = Concreto Asfáltico
PCC = Concreto de Cemento Portland
JPCP = Pavimento de Concreto con juntas sin refuerzo
JRCP = Pavimento de Concreto con juntas con refuerzo
CRCP = Pavimento de Concreto con refuerzo continuo

El objeto de estos recapeos tiene dos funciones, dependiendo de cual de las dos condiciones es la que se quiere recuperar o si es combinado, ya que una de las funciones es la capacidad estructural y la otra es la serviciabilidad.

La primera aplica cuando las condiciones de la estructura de pavimento esta llegando a su periodo de diseño y es necesario el refuerzo de la estructura para soportar el crecimiento del tránsito y por ende de las cargas; la segunda aplica cuando las condiciones de la superficie del pavimento ha llegado a su vida útil y sufrido tal deterioro que no permita el desplazamiento normal de los vehículos.

En las figura 8-2 se observa como se recupera un pavimento a su condición original al efectuar un recapeo, en el aspecto de serviciabilidad y capacidad estructural respectivamente.

Figura 8-2
Pérdida de capacidad estructural después de tiempo y tránsito



Fuente: Guía para diseño de estructuras de pavimento, AASHTO, 1,993

Para el diseño del recapeo de una estructura de pavimento por el método de AASHTO, es necesario seguir los siguientes pasos descritos a continuación, en los que a manera de ejemplo se analizará el recapeo de Concreto Asfáltico sobre Concreto Asfáltico:

Paso 1: Diseño y construcción de pavimentos existentes

Reunir información del pavimento existente en:

- Espesor y tipo de material para cada capa de pavimento
- información disponible de la subrasante

Paso 2: Análisis del tránsito

- Estimación pasada de Ejes equivalentes, ESAL´s (80 kN) en el carril de diseño desde la construcción (N_p)
- Estimación futura de Ejes equivalentes, ESAL´s (80 kN) en el carril de diseño sobre el periodo de diseño (N_f)

Paso 3: Inspección de las condiciones del camino

Medir (como mínimo) las siguientes fallas:

- Porcentaje de área de superficie con cuero de lagarto (bajo, mediano o alto daño)
- Número de grietas transversales por c/milla (1.6 kms) (bajo, mediano o alto daño)
- Promedio de profundidad surcos
- Evidencia de bombeo en las grietas y bordes del pavimento

Paso 4: Prueba de deflexiones/análisis

Pruebas en campo

- outer wheelpaht
- 30 a 300 m (100 a 1,000 pies)
- deflexiones a 40 kN (9,000 lbs)
- Algunas distancias radiales

- Medida de la temperatura del pavimento

Análisis

- Módulo de resiliencia de la subrasante lejos de la deflexión

  $Mr = 0.24 \times P / (d_r \times r)$

- Módulo efectivo del pavimento

  - Corrección d_o de temperatura del pavimento
  - Aplicar ecuación o figura para determinar Ep

Paso 5: Núcleo y prueba del material

- Localización basada sobre el análisis de los trazos de los perfiles de las deflexiones.
- Pruebas de laboratorio para Mr de la subrasante
  - Medida directa (AASHTO T-292-91 I)
  - Correlaciones
- Cemento asfáltico y base estabilizada – calcular el potencial de desvestimiento
- Base granular / subbase – calcular la degradación y contaminación por finos
- Verificar espesor de capas

Paso 6: Determinación del número estructural requerido para el tránsito futuro, Sn

- Módulo efectivo para diseño de subrasante, Mr
  Diseño $Mr = C \times 0.24 \times P / (d_r \times r)$
  (Se recomienda C = 0.33)
- Confiabilidad, R
- Desviación estándar total, S_o
- Pérdidad de serviciabilidad, ΔPSI
- Tránsito futuro (ESAL´s) $W_{18} = N_f$

Ejemplo: Hoja de trabajo para determinar el número estructural requerido para un tráfico futuro

TRÁNSITO

Ejes equivalentes de 82 kN en el carril de diseño sobre el nuevo período de diseño, $\mathbf{N_f}$ **=** 2,400,000

Módulo efectivo de resiliencia de la subrasante

Módulo de resiliencia de diseño, M_r **=** 5,800

(Este valor debe ser ajustado con el modelo de pavimento flexible y las variaciones de la época seca o lluviosa. Valores típicos de diseño de M_r son de 15 a 70 MPa [2,000 a 10,000 lbf/in^2] para suelos con agregados finos, de 70 a 140 MPa [10,000 a 20,000 lbf/in^2] para suelos gruesos granulares. AASHO Road Test, utiliza valores de suelos en la ecuación de diseño de pavimentos flexibles 20 MPa [3,000 lbf/in^2]).

Pérdida de serviciabilidad

Pérdida de serviciabilidad de diseño PSI ($P_1 – P_2$) (1.25 a 2.50)
= 4.20 – 1.50 = 1.7

Confiabilidad de diseño

Confiabilidad de diseño para una sobrecapa,
R (80 a 99 por ciento) = 90 por ciento

Desviación estándar total, S_o (Normalmente 0.49) = 0.49

Capacidad estructural futura

El número estructural requerido para el tránsito futuro, es determinado con los datos anteriores, en la ecuación de diseño de pavimentos flexibles de la figura 7-1.

SN_f **= 4.50**

Paso 7: Determinación del número estructural efectivo para pavimentos existentes SN_{eff}

- Método NDT

$$SN_{eff} = 0.0045 \times D \times (Ep)^{0.33}$$

Donde: D = Espesor total para todas las capas desde la subrasante, plgs
Ep = Módulo efectivo del pavimento, psi

- Método de las condiciones del camino

$$SN_{eff} = a_1 D_1 + a_2 D_2 M_2 + a_3 D_3 M_3$$

- Método de vida remanente

  - Determinar remanente de vida

$$RL = 100 (1 – Np / N_{1.5})$$

  - Determinar factor de condición, CF (de la figura)
  - Calcular SN_{eff} (considerar la reparación de la capa bajo la sobre capa)

$$SN_{eff} = CF \times Sn_o$$

Ejemplo: Hoja de trabajo para determinar el número estructural remanente de un pavimento

Método de la vida remanente por fatiga

Tránsito

Ejes equivalentes de 82 kN en el carril de diseño cuando de construyo la carretera, $\mathbf{N_p}$ **=** 400,000

Ejes equivalentes de 82 kN en el carril de diseño que producen falla en la carretera existente, $\mathbf{N_{1.5}}$ **=** 1,140,000

Vida Remanente, RL = 100 [1 - { N_p / $N_{1.5}$ }] = 65

Con este valor (65) encontramos el factor de condición en la Figura 8-3 = 0.93

Espesor de concreto asfáltico de la superficie existente, D_1 = 4.25 pulg.

Coeficiente Estructural del Concreto Asfáltico, a_1, de lo existente = 0.44

Espesor de la base, D_2 **=** 8.00 pulg.

Coeficiente Estructural de la base existente, a_2 = 0.14

Coeficiente de drenaje de la base existente, m_2 = 1.00

Espesor de la sub-base, D_3, si existiera =

Coeficiente Estructural de la sub-base si existiera, a_3 =

Coeficiente de drenaje de la sub-base si existiera, m_3 =

Aplicando la fórmula 7-1, en donde

$$SN_0 = a_1 \times D_1 + a_2 \times D_2 \times m_2 + a_3 \times D_3 \times m_3 = 2.99$$

Número Estructural Remanente = SN_{eff} = CF x SN_0 = 0.93 x 2.99 = 2.78

Coeficiente Estructural de la nueva capa de Concreto Asfáltico con un Módulo de Elasticidad de 300,000 (Tabla 7-3) = 0.37

Paso 8: Determinación de espesores de sobrecapas

$D_{01} = SN_{01} / a_{01} = (SN_f - SN_{eff}) / a_{01}$

Donde:

SN_{01} = Número estructural requerido del recapeo
A_{01} = Coeficiente estructural para recapeo de concreto asfáltico
D_{01} = Espesor requerido de recapeo, inca.
SN_f = Número estructural requerido para el tránsito futuro determinado en el paso 6
SN_{eff} = Número estructural efectivo determinado para pavimento existente del paso 7

Para el espesor de la sobre capa, se tiene:

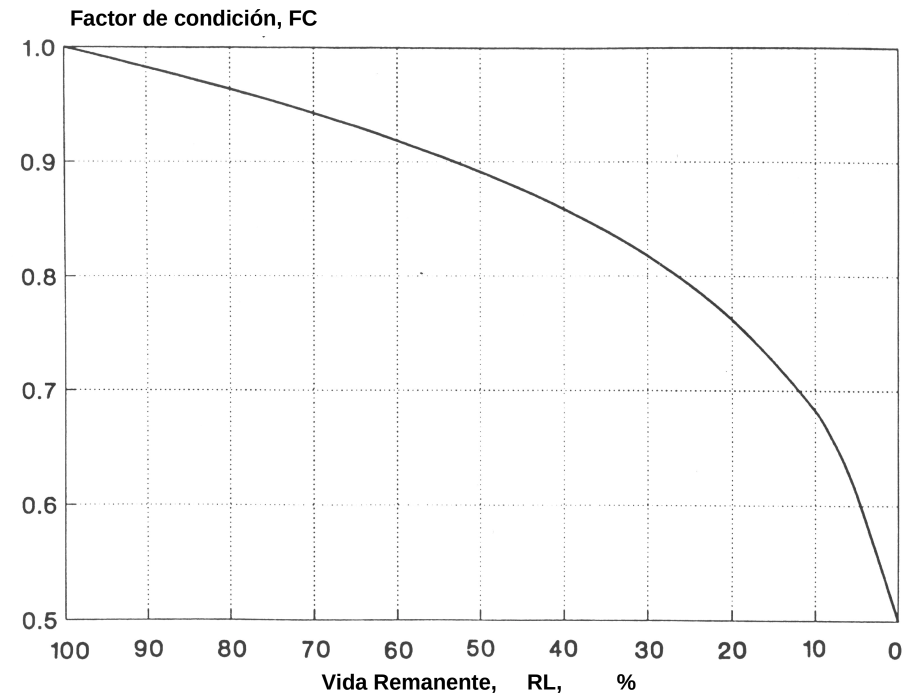
$D_{01} = SN_{01} / a_{01}$

En donde: $= (SN_f – SN_{eff}) / a_{01}$

$= (4.50 – 2.78) / 0.37$

= 4.65” = 4.70 plg = 11.8 cm

Figura 8-3
Relación de pérdida de factor de condición y pérdida de vida



Fuente: Guía para diseño de estructuras de pavimentos, AASHTO, 1,993

CAPÍTULO 9

DESCRIPCION DE PROCEDIMIENTOS ANALÍTICOS, EMPÍRICOS Y MECANÍSTICOS, PARA DISEÑO Y EVALUACIÓN DE ESTRUCTURAS DE PAVIMENTO

9.1 Introducción

El uso de procedimientos analíticos para estimar el esfuerzo, la tensión ó deflexión del estado de un pavimento, no son métodos nuevos. Para pavimentos de concreto hidráulico, el uso de tales métodos de diseño datan desde 1938, cuando Bradbury publicó un documento sobre el diseño de pavimentos de concreto reforzado; desde dicha fecha ha habido contribuciones extensas de muchos investigadores. Para pavimentos de concreto asfáltico, hay publicaciones desde 1940 que han proporcionado varias de las teorías básicas aplicables a este tipo de pavimentos.

El uso de procedimientos analíticos se refieren a la capacidad numérica para calcular esfuerzos, tensiones ó deflexiones en un sistema de capas múltiples como es en un pavimento cuando está sujeto a cargas externas, efectos de temperatura ó humedad.

Los métodos analíticos se basan en la determinación del estado de tensiones y deformaciones originado por las solicitaciones en las distintas capas del pavimento, que se asimilan previamente a un modelo físico ideal (modelo de respuesta) al cual se pueden aplicar las teorías existentes sobre resistencia de materiales, analizando su deterioro.

Los modelos físicos de respuesta pueden ser de tres tipos en función de la modelación geométrica y de cálculo en que se basen:

- sistemas multicapa
- teoría de placas
- elementos finitos

Por otro lado, según las ecuaciones constitutivas de los materiales los modelos pueden clasificarse en elásticos y viscoelásticos.

Para pavimentos bituminosos los modelos más utilizados son los basados en sistemas multicapas y ecuaciones elásticas (hipótesis de Burmister); para los pavimentos de concreto hidráulico generalmente se utiliza la teoría de placas y ecuaciones elásticas (hipótesis de Westergaard). El método de los elementos finitos permite analizar, en el campo de la elasticidad o viscoelasticidad, problemas como la influencia de las fisuras en el deterioro de los pavimentos y su propagación.

Al analizar los fallos o deterioros, los métodos que trabajan con las hipótesis de Burmister, suelen recurrir a leyes de fatiga y de acumulación de deformaciones plásticas.

Los métodos analíticos presentan la ventaja de poder determinar los espesores de las distintas capas con coeficientes de seguridad análogos evitando el agotamiento prematuro de alguna, que daría lugar a una redistribución tensional en el pavimento y su rápida ruina.

9.1.1 Metodología general

El desarrollo de los métodos analíticos de dimensionamiento de pavimentos consta de las siguientes etapas:

- Determinación de solicitaciones: en el dimensionamiento analítico de los pavimentos se debe estimar el número de aplicaciones de carga de cálculo estándar (ejes tipo equivalente) durante el período de proyecto. Para ello se parte del espectro de carga actual, los factores de equivalencia entre ejes, la tasa de crecimiento acumulativo del tránsito y el período de vida del proyecto.

  La carga estándar se define por la presión de contacto, el radio del círculo equivalente a la huella y la configuración de los neumáticos (ruedas simples o gemelas). Como presión de contacto se suele adoptar un valor de 0,9 MPa. La carga queda definida por dos círculos (ruedas gemelas) sobre los que se distribuye la presión de contacto, la separación entre los dos círculos se suele suponer igual a un radio.

- Modelización de la sección estructural del pavimento (modelos de respuesta): en el caso de pavimentos bituminosos aplica la hipótesis de Burmister y si el pavimento es de concreto hidráulico aplica la hipótesis de Westergaard.

- Selección de los materiales a emplear en las distintas capas y estimación de espesores necesarios.

- Análisis de la estructura, determinando las tensiones, deformaciones y desplazamientos (deflexiones) máximos que se pueden producir bajo la acción de la carga estándar.

- Comparación de los valores obtenidos con los admisibles para cada material según el criterio de falla considerada.

- Comprobación mediante los criterios de fallo de que cada capa llega al final de la vida útil con un nivel de deterioro admisible y similar al resto de las capas.

- Si no ocurre lo anterior, se necesita efectuar un nuevo cálculo modificando los espesores o las características resistentes de las capas de forma que cada una de ellas alcance un deterioro admisible similar al final de la vida útil.

- Comparación económica de las soluciones obtenidas con las distintas combinaciones de materiales introducidas en el modelo, teniendo en cuenta los gastos de construcción y conservación.

El proceso de cálculo analítico tiene un carácter iterativo, lo que permite su resolución mediante ordenador, existiendo en el mercado numerosos programas (Chevron, Bisar, Elsym. Alize, etc.).

9.2 Modelo de respuesta

Los distintos modelos de respuesta existentes para el proyecto de pavimentos difieren por las hipótesis adoptadas en relación a:

- Naturaleza de los materiales (elástica o viscoelástica).
- Tipología de las cargas,

- Condiciones de contacto entre capas (adherencia total; parcial o nula)
- Condiciones del entorno

La mayoría de los programas de cálculo analítico existentes se basan en modelos de respuesta elásticos.

A continuación se mencionan las hipótesis de ambos modelos.

9.2.1 Hipótesis de Burmister

Son las siguientes:

a) El pavimento se representa como una estructura constituida por una serie de capas horizontales paralelas, indefinidas en planta y de espesor constante, apoyadas en un espacio Semiindefinido de Boussinesq.

b) Cada capa se comporta como un media elástica lineal, homogénea, isótropo y continuo. Se caracteriza mecánicamente por su módulo de elasticidad y su coeficiente de Poisson.

c) Cada una de las cargas que actúan sobre el pavimento, se representan, mediante una presión, en general vertical, distribuida uniformemente sobre un área circular.

d) Cada capa se apoya sobre la subyacente de forma continua. El contacto entre capas puede modelarse en condiciones de adherencia total (igualdad de deformaciones horizontales) o nula.

e) Se desprecian las fuerzas de inercia y los efectos térmicos.

f) Las deformaciones que se producen en el sistema son pequeñas.

g) No se suelen considerar los esfuerzos cortantes que se producen en las zonas de contacto entre las cargas y la superficie del pavimento, debido a que salvo en casos excepcionales son prácticamente despreciables.

Las hipótesis de Burmister suponen el contacto entre las capas del pavimento con adherencia total o nula. El grado de adherencia real que se puede conseguir entre dos materiales depende de su naturaleza y sobre todo de como se ha realizado la puesta en obra. Incluso partiendo de una adherencia prácticamente total, la diferencia de rigideces acaba conduciendo, por efecto de las cargas y del agua, a un cierto grado de despegue. La hipótesis de adherencia nula supone también un alejamiento de la realidad por cuanto siempre existe rozamiento entre los materiales.

La adherencia entre dos capas consecutivas es una de las variables que más influye en las tensiones y deformaciones que se producen. Por ello para capas que puedan resultar criticas en el dimensionamiento deben compararse los resultados de dos hipótesis. Si se quiere adoptar una situación única, se recomienda considerar adherencia nula en el caso de materiales tratados (con ligantes bituminosos o conglomerados hidráulicos) sobre explanada o sobre capas granulares. En los restantes casos, puede adoptarse, con las salvedades reseñadas, la hipótesis de adherencia total.

9.2.2 Hipótesis de Westergaard

Estas hipótesis, aplicables a los pavimentos de concreto hidráulico, se pueden resumir en los siguientes puntos:

a) Se supone que la losa es de espesor uniforme y que se comporta como un medio elástico lineal, homogéneo, isótropo y continuo, caracterizado mecánicamente por su módulo de elasticidad y su coeficiente de Poisson.

b) La losa está en equilibrio bajo la acción de las cargas del tránsito, su peso propio, las reacciones de las losas continuas y la del apoyo.

c) La reacción del apoyo se considera en cada punto proporcional al hundimiento del mismo (macizo de Winkler) con una constante de proporcionalidad denominada módulo de reacción o de balasto.

9.3 Criterios de falla

A lo largo del proceso de dimensionamiento de los pavimentos por métodos analíticos, es preciso comprobar que:

- ♦ La tensión o deformación crítica es inferior a la máxima admisible y que, por tanto, el material es capaz de soportar la aplicación de la carga tipo.
- ♦ El número máximo admisible de aplicaciones de carga (N), deducido de la correspondiente ley de deterioro, es superior al esperado según los estudios de tránsito realizados. (Estaciones de peaje)

Una vez hecho el anterior análisis para todas las capas, se puede considerar que un dimensionamiento será tanto más ajustado cuanto más próximos sean los valores de N para cada una de ellas.

En las explanadas se suele adoptar como criterio de fallo la deformación vertical ϵ_z en su coronación. Se limita su valor dado por leyes del tipo:

$$\epsilon_z = K \times N^{-2}$$

Siendo:

N El número de aplicaciones de carga.
K Un coeficiente que varia entre 0,5 y 1, en función de las características del material granular.

El fallo de las capas granulares puede producirse por descompactaciones locales, originadas por las tracciones que aparecen en la cara inferior de las capas. Se puede suponer que no se produce este fallo cuando se cumple;

$$\sigma_h \leq K\ (\ \sigma_z + q\ )$$

siendo:

σ_h La tensión horizontal
σ_z La tensión vertical debida a las cargas
q El peso propio de los materiales situados por encima

K Un coeficiente que varia entre 0,5 y 1, en función de las características del material granular.

Otro criterio de fallo que puede utilizarse es uno análogo al indicado para las explanadas.

El criterio de fallo más usual en las capas tratadas con conglomerantes hidráulicos es fijar que la tensión de tracción en la cara inferior de la capa no supere el 50 o 60% de la resistencia a flexotracción del material.

En los materiales estabilizados con ligantes bituminosos y mezclas bituminosas una de las causas más frecuentes de fallo está motivada por la existencia de tracciones elevadas en la cara inferior de las capas. Existen numerosas leyes para cuantificar la fatiga elástica de las mezclas bituminosas, la mayoría de ellas con expresiones del tipo:

$$N = a \times \epsilon_z^{-b}$$

N Número admisible de aplicaciones de carga
ϵ_z Deformación radial de tracción
a y b: Constantes

9.4 Comprobaciones finales

Dada la dificultad para evaluar los deterioros y establecer valores críticos, el principal problema que presentan los métodos analíticos de dimensionamiento es la comprobación de en que medida las conclusiones que de ellos se puede extraer concuerda con la realidad.

9.5 Métodos empíricos

En la mayoría de los países se utilizan programas de ordenadores para el estudio analítico de secciones estructurales de pavimentos de nueva construcción; no obstante, en muchos de ellos la normativa vigente para su dimensionamiento se apoya en catálogos de secciones tipificadas o ábacos, que se basan no solo en criterios experimentales obtenidos en ensayos sobre secciones reales de carreteras o en laboratorio, sino que también se apoyan en hipótesis analíticas y han sido comprobados con programas de cálculo analítico.

El motivo de que se sigan utilizando los métodos empíricos a pesar del creciente uso de los analíticos, es la conveniencia de que el proyectista pueda concentrar sus esfuerzos en la selección adecuada de los materiales existentes en las proximidades de la obra a realizar, sin tenerse que dedicar al cálculo, tarea que a veces tiende a alejar de la realidad.

A los métodos empíricos de dimensionamiento se les puede criticar que no se adaptan con facilidad a la amplia casuística con la que se puede encontrar un proyectista. Sin embargo, conviene tener en cuenta que los métodos empíricos están basados en amplias experiencias. Dado que estas experiencias son fundamentalmente locales, no es recomendable aplicarlos indiscriminadamente en ámbitos distintos de aquel en que se concibieron, ya que las adaptaciones del tránsito, características y especificaciones de materiales, factores climáticos, etc. pueden ser muy difíciles de realizar.

9.5.1 Metodología general

La metodología seguida en los distintos métodos empíricos de dimensionamiento de pavimentos es sensiblemente similar, pudiendo distinguirse las siguientes etapas:

a) Establecimiento del período de proyecto o de servicio del pavimento (10 a 40 años), al final del cual se llegaría a un grado de deterioro predeterminado.

b) Determinación de los datos de entrada
   - Características del suelo de la explanada (CBR, E, v, etc.)
   - Tránsito del proyecto.
   - Condiciones locales y estacionales.

c) Determinación de la solución o soluciones, mediante una sistemática propia de cada método: ábacos, nomogramas, tablas o catálogos de secciones estructurales.

   Cuando como solución se determinan espesores de capas del pavimento, estos pueden venir expresados de dos formas:

- Espesor total ficticio del pavimento, usando un solo material tipo (material granular o mezcla bituminosa) Estos espesores ficticios se transforman mediante unos coeficientes de equivalencia, en espesores de capas reales formadas por los materiales disponibles.
- Combinaciones ya estudiadas de diversos materiales con espesores diferentes.

Muchos métodos empíricos independizan el cálculo del espesor de la capa inferior del pavimento (normalmente subbase granular) del resto, fijando este y las características de la subbase en función de la capacidad soporte de la explanada. Los espesores de las capas de base y pavimento se definen en función del tránsito.

d) En los métodos que parten de espesores ficticios usando un solo material, se suele necesitar un ajuste final de las secciones proyectadas, mediante la aplicación de una serie de limitaciones o recomendaciones propias de cada método.

Actualmente, es habitual que el proyectista realice, con la ayuda de métodos analíticos, alguna comprobación complementaria de los estados tensionales y deformacionales de la estructura proyectada.

Los procedimientos mecanísticos se referirán a la capacidad de traducir los cálculos analíticos como respuesta del pavimento a su funcionamiento. El funcionamiento para la mayoría de los procedimientos usados, se refiere a las señales físicas como el agrietarse ó rajarse.

Para los pavimentos rígidos, los procedimientos se han aplicado para la determinación de dovelas, requerimientos de esfuerzo y espaciamiento de juntas. Para pavimentos flexibles los procedimientos mecanísticos también se han aplicado para las predicciones de rugosidad.

Los procedimientos mecanísticos, están basados, considerando que los pavimentos pueden ser modelados como múltiples capas elásticas

ó como estructuras visco-elásticas; asumiendo que los pavimentos se pueden modelar de esta manera, es posible sobre una fundación elástica ó visco-elástica, calcular los esfuerzos, tensiones ó deflexiones (debido a las cargas y/o tránsito) en cualquier punto adentro ó debajo de la estructura de pavimento.

Sin embargo, los investigadores reconocen que el comportamiento de un pavimento está influenciado probablemente por un número de factores que no son precisamente modelados para métodos mecanísticos; por lo tanto, es necesario calibrar los modelos haciendo observaciones sobre su rendimiento como por ejemplo: haciendo correlaciones empíricas.

Los investigadores en este campo, tienen hipótesis sobre los modelos de pavimento, como se describió anteriormente, para mejorar la confiabilidad de las ecuaciones de diseño, que son en efecto predicciones de modelos.

Por ejemplo, los nomogramas de diseño estiman el espesor de la estructura de pavimento requerido, para mantener un aceptable nivel de servicio para un número específico de cargas de tránsito. De manera similar, los procedimientos mecanísticos, pronostican el deterioro del pavimento en función del tránsito y/o del ambiente.

La mayoría de métodos para diseño de pavimentos flexibles hacen un uso no directo de procedimientos de diseño mecanístico; con pequeñas excepciones, el Departamento de transportes de Kentucky, el Instituto de Asfalto y Shell internacional, tienen un completo desarrollo de procedimientos para aplicaciones generales.

En el caso de pavimentos rígidos, los métodos para diseño estructural incluyen ahora conceptos mecanísticos de diseño. El método de Pórtland Cement Association, para grietas por fatiga, es un ejemplo representativo. (ver capítulo 7).

La metodología de diseño incorporada en 1972 en AASHTO para pavimentos flexibles, no incluía procedimientos mecanísticos; aunque el trabajo de soporte introduce estos conceptos para el posible uso futuro, se han utilizado indirectamente procedimientos mecanísticos

para evaluar el daño estacional y para establecer coeficientes de drenaje y transferencia de carga.

También el uso del módulo de resiliencia para representar las propiedades del material introduce el concepto de que los materiales del pavimento pueden ser representados por un módulo cuasi elástico.

9.6 Beneficios de los métodos analíticos

Para desarrollar los procedimientos hipotéticos de diseño mecanísticos-empíricos de estos métodos, son basados en una teoría establecida hace mucho tiempo con modelos de pavimentos corregidos de las ecuaciones empíricas y son tradicionalmente utilizados para pavimentos flexibles y en algunos aspectos para pavimentos rígidos.

Los beneficios que se pueden derivar de la correcta aplicación de los procedimientos mecanísticos son: 1. Confiabilidad mejorada para el diseño, 2. Capacidad de predecir tipos específicos de fallas, 3. Capacidad de extrapolar resultados de campo y laboratorio.

El primer beneficio, es la capacidad de diseñar un pavimento para un sitio especifico, ya que métodos de diseño más confiables darán como resultado un uso óptimo de los recursos disponibles.

Un segundo beneficio de los procedimientos mecanísticos, es la capacidad de predecir tipos específicos de fallas, como ejemplo: grietas, defectos, rajaduras, etc. Los sistemas de administración de pavimentos necesitan de la capacidad de predecir la ocurrencia de fallas con el objeto de minimizar los costos de mantenimiento y rehabilitación.

La tercera ventaja principal, es la capacidad de extrapolar de datos de campo o laboratorio, proyecciones del comportamiento de un diseño, antes de hacer a escala completa un proyecto de demostración, ya que un proceso estudiado ahorra dinero y tiempo eliminando gastos innecesarios.

Otros beneficios que resultan del desarrollo de procedimientos mecanísticos, se resumen así:

a) Estimación de las consecuencias derivadas de nuevas cargas deben ser evaluadas, por ejemplo el efecto perjudicial de incrementar cargas, alta presión de las llantas, ejes múltiples, etc. pueden ser modelados usando métodos mecanísticos.

b) Mejor utilización de los materiales disponibles pueden ser estimados, por ejemplo el uso de materiales estabilizados en pavimentos rígidos y flexibles, que pueden ser simulados para un futuro funcionamiento.

c) Mejorar los procedimientos para una evaluación prematura de fallas pueden ser desarrollados o a la inversa, para analizar por qué algunos pavimentos exceden sus expectativas de diseño; en efecto, mejores técnicas de diagnóstico deben ser desarrolladas.

d) Señales de envejecimiento deben ser incluidas en el funcionamiento, por ejemplo: asfaltos que endurecen con el tiempo y que en su turno aparecen efectos de grietas por fatiga y rajaduras.

e) Efectos estacionales como el deshielo, pueden ser incluidos para estimaciones de rendimiento.

f) Consecuencias por la erosión de la subbase bajo los pavimentos rígidos pueden ser evaluadas.

g) Mejores métodos pueden ser desarrollados para evaluar a largo plazo, los beneficios de mejorar el drenaje en la sección de la carretera.

En resumen, la implementación de procedimientos de diseño mecanístico-empíricos tienen aplicación limitada para pavimentos flexibles, sin embargo existe un consenso entre muchos investigadores que estos métodos ofrecen oportunidades para mejorar la tecnología del pavimento para este tipo de construcción en las próximas décadas.

La aplicación de análisis y procedimientos mecanísticos son ahora usados para el diseño de pavimentos rígidos y tiene probabilidad de que sea efectivos. La extensión de estas técnicas para nuevos diseños

y diferentes aplicaciones es considerado ser un objetivo viable para los años por venir.

9.7 Marco para el desarrollo y aplicación

En la figura 9-1 se muestra el marco para el desarrollo de los procedimientos de diseño mecanísticos-empíricos para nuevos diseños y rehabilitaciones. La figura 9-2 ilustra la aplicación para una sobrecapa en pavimentos flexibles.

La entrada de datos requeridos por el sistema, incluyen tránsito, propiedades de la subrasante, ambiente, características del material e incertidumbre, es decir, variación sobre cada uno de los datos de información. Envejecimiento de los materiales y los requerimientos de construcción pueden ser incluidos en las características de los materiales.

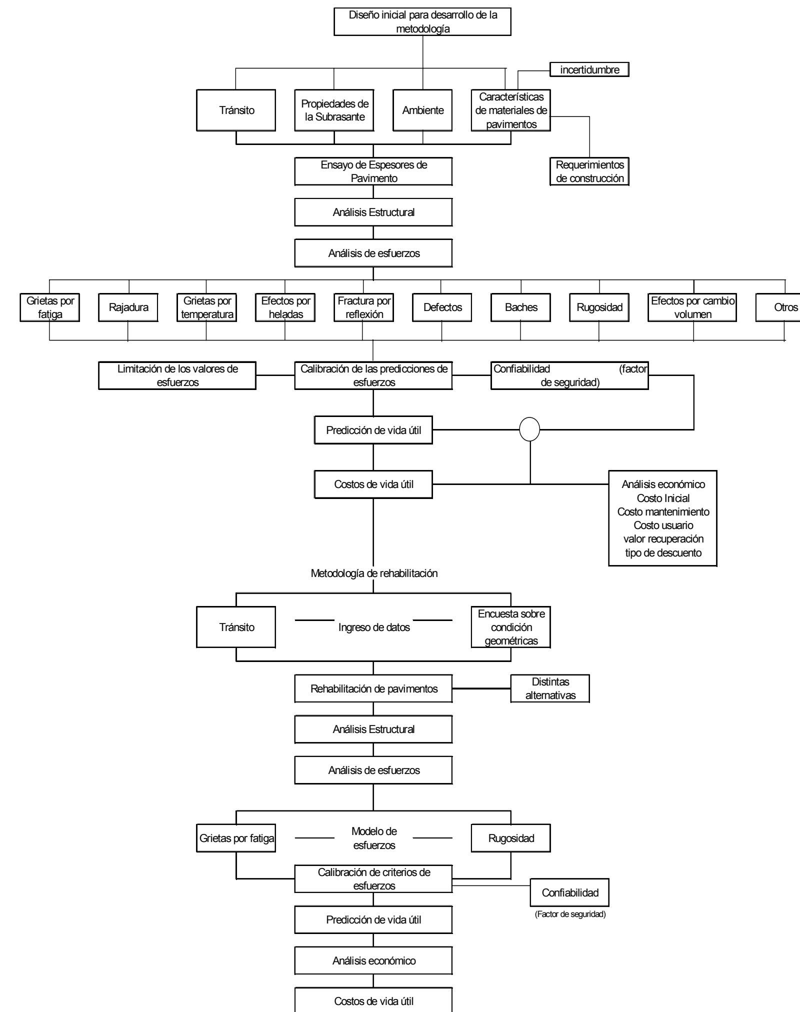
El proceso requiere la selección de una serie de pruebas en secciones de pavimento, rígido ó flexible, que consideran incluir un rango de espesores y propiedades del material para el problema de diseño. Un análisis estructural es hecho para cada una de las secciones de prueba para calcular el esfuerzo, tensión, deflexión, etc. en una localización específica dependiendo de los criterios de falla.

Una hipótesis de funcionamiento ó criterio de falla puede ser desarrollada para grietas por fatiga; cada uno de los tipos de fallas se predecirán por el procedimiento mecanístico. Por ejemplo: el criterio para pavimentos rígidos es basado sobre la máxima tensión de esfuerzo en la losa y para pavimentos flexibles es basado sobre la máxima tensión del concreto asfáltico. Criterios similares se han desarrollado para cada uno de los tipos de fallas, grietas por fatiga, rajaduras, defectos, baches.

La figura 9-1 representa el desarrollo del marco; esto es necesario para calibrar los modelos de fallas observadas en el campo. Este paso proporciona información con respecto a las relaciones de respuesta del pavimento para varios niveles y cantidad de fallas. De esta correlaciones, ha sido posible establecer relaciones mecanísticas-

empíricas para estimar el tipo y cantidad de deterioro como una función de las variables ingresadas.

Figura 9-1
desarrollo de un modelo de diseño mecanístico - empírico



Basado sobre las predicciones del ciclo de vida, es posible calcular los costos de este de acuerdo a los procedimientos descritos. El marco requiere que los análisis sean completados en orden, para ser capaz de interpolar, para condiciones especificas de diseño y seleccionar una mejor solución basada en el desempeño y costo.

Un procedimiento similar es ilustrado para la rehabilitación. En este caso el método requiere condiciones de prueba para los diseños apropiados de rehabilitación; sin embargo, en una construcción nueva, los datos de entrada incluyen: tránsito, propiedades del suelo de la subrasante, requerimientos de construcción, etc.

En la figura 9-2, la metodología propuesta por algunos investigadores para sobrecapas es muy general. El método es resumido abreviadamente como sigue:

a) Condiciones de inspección y pruebas no destructivas (deflexiones, ahuellamiento, etc.). La información es recibida en orden para identificar las secciones de análisis.

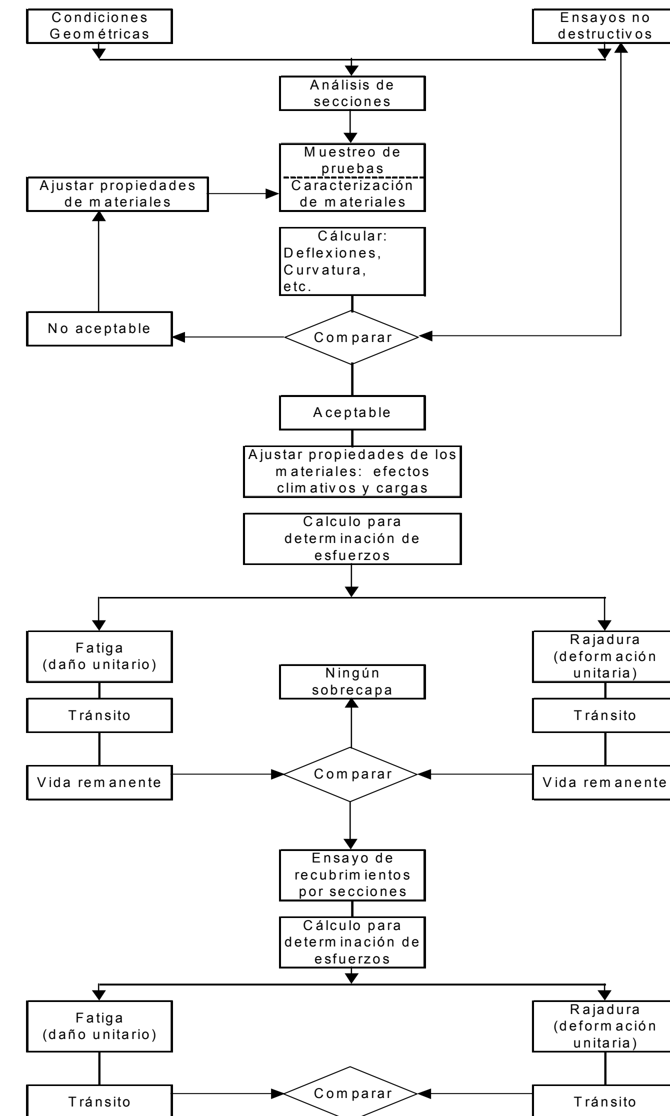
b) El muestreo y pruebas del material en el lugar deben ser completadas sobre una base limitada en orden, para ajustar las propiedades a las condiciones de campo.

c) Variaciones estacionales de las propiedades del material y de tránsito son determinadas para calcular el esfuerzo. La información usada en este paso, viene de la investigación y desarrollo como lo representado en la figura 9-1.

d) Los dos tipos de esfuerzo usados para el diseño de la sobrecapa de asfalto, son: rajaduras y grietas por fatiga. Por ejemplo: si el pavimento original es concreto con cemento Pórtland, el criterio usado es la reflexión de grietas y las rajaduras.

e) Basado en el análisis de esfuerzos, una determinación es hecha a medida que es necesaria una sobrecapa estructural; si no es requerido el pavimento usado, será renovado por reciclaje, pulverizándolo ó colocando una sobre capa al costo mínimo.

Figura 9-2
Procedimiento de diseño para sobrecapas utilizando la teoría de capa elástica para representar la reacción de un pavimento



Si requiere una sobrecapa, una sección de prueba será analizada para producir gráficos de tránsito contra los requerimientos de espesor necesitados para satisfacer lo requisitos específicos, ejemplo: las fallas no deben exceder de 0.5 de pulgada y las grietas no más del 25 %.

En resumen, el cuadro proporciona un conjunto de líneas de guía, un marco para desarrollar procedimientos de diseños mecanísticos. Otros procedimientos más detallados pueden ser utilizados; sin embargo, los requerimientos generales serán los mismos.

9.8 Implementación

Para la implementación de un procedimiento de diseño mecanístico de pavimentos, se requiere considerar lo siguiente:

a) Determinar los tipos y criterios de falla, por ejemplo: grietas, rajaduras, etc.

b) Desarrollo de un plan para obtener la información de entrada.

c) Adquisición de equipo

d) Hardware y Software de computación

e) Entrenamiento de personal

f) Desarrollo y calibración de modelos de predicción

g) Pruebas

La implementación de los modelos mecanísticos puede tomar varias formas.

- Los procedimientos podrían ser usados para desarrollar similares curvas de diseño como las implementadas por el Instituto de Asfalto, Shell Internacional y el Departamento de Transporte de Kentucky. En esta forma, el analista puede pre-resolver un buen número de problemas para implementar curvas de diseño, y el usuario requiere también de un trabajo analítico para preparar recomendaciones de diseño.

- Los procedimientos pueden ser utilizados en caso de lugares específicos, para predecir el comportamiento cuando las condiciones exceden de los criterios normales de diseño, por ejemplo: Cargas excesivas en vehículos normales ó cargas en vehículos no normales.

- Los procedimientos pueden ser utilizados para contestar las preguntas así: ejemplo: cual seria el efecto de incrementar la carga sobre un eje legal y su funcionamiento ó cual seria el efecto de incrementar la presión de las llantas ó cuales son las consecuencias probables de no cumplir con las especificaciones.

- Principios de procedimientos de diseño mecanístico para pavimentos flexibles se han desarrollado a través de más de 20 años de investigación. Sin embargo, para su implementación se tiene que dar especial atención a los siete items del inciso 2.

9.9 Consideraciones de diseño

Procedimientos mecanísticos de diseño pueden ser aplicados a una amplia variedad de pavimentos como se describen en el inciso 3. Los tipos predominantes de esfuerzos pueden ser predecidos por procedimientos mecanísticos de diseño, como las condiciones físicas causadas por las cargas de tránsito o el ambiente. Solo un procedimiento mecanístico de diseño, se relaciona directamente para la predicción de la calidad de la superficie de un pavimento, por ejemplo: el índice de serviciabilidad presente.

El programa VESYS desarrollado por FHWA, ha incluido esta capacidad pero requiere de una calibración cuidadosa. Para la comodidad de transitar en una carretera, otras instituciones han desarrollado métodos empíricos utilizando datos de presión, esfuerzo ó deformación como variables independientes para correlacionarlas con las observaciones de campo.

De este modo, consideraciones de diseño satisfacen mejor el control de esfuerzos que es necesario efectuar para el desempeño de la clase de mantenimiento ó rehabilitación que deben ser considerados. Una

prueba bien planificada, debe incluir valores de las características de los materiales y condiciones del lugar, esto reducirá una buena cantidad de pruebas requeridas para el diseño rutinario; experimentos similares de diseño necesitan obtener datos de temperatura, precipitación pluvial y la información de tránsito, para facilitar el desarrollo de procedimientos simplificados que satisfagan los datos de entrada.

En resumen, decide que tipos de esfuerzos controlan el diseño y establece los valores marco para cada uno, es decir, cuantas grietas ó fallas se consideran aceptables antes del mantenimiento ó rehabilitación.

9.10 Ingreso de datos

Para hacer los cálculos, será necesario obtener la información relacionada con las propiedades de los materiales, ambiente y patrones de tránsito.

Para obtener la información concerniente a las propiedades de los materiales, es necesario adquirir equipo de laboratorio y de pruebas de campo.

9.11 Sumario

Los beneficios de implementar procedimientos de diseño mecanísticos - empíricos para la construcción de nuevos pavimentos, reconstrucción y/o rehabilitación son muchos. La ventaja principal consiste en proveer al diseñador de herramientas completas para evaluar el comportamiento de los pavimentos para no depender de correlaciones u opiniones empíricas limitadas.

Diferentes factores de diseño de pavimentos pueden ser examinados usando un procedimiento mecanístico de diseño, lo que permite una mejor evaluación de los componentes individuales de los pavimentos. El análisis del costo de un pavimento, conduce a determinar el costo eficiencia que representa la modificación del diseño.

Diseños mecanísticos tienen el potencial de mejorar diseños de pavimento y proveer procedimientos más confiables de diseño.

El uso de computadoras personales que son capaces de manejar programas mecanísticos de diseño, proporcionaran un ambiente más practico al diseñador de pavimentos y aumentará el potencial para el uso de procedimientos mecanísticos.

El cálculo de esfuerzos y deformaciones que se producen en una estructura de pavimento es necesario hacerlos en una computadora con software diseñado especialmente, el cual permite realizar dichos cálculos para las diferentes capas de pavimento y analizar su comportamiento con diferentes combinaciones de tránsito y propiedades de los materiales.

Para el efecto, existe gran variedad de paquetes informáticos que consideran diferentes tipos de análisis y cada diseñador debe utilizar el que le resulte más conveniente.

La Guía de Diseño AASHTO en su edición de 1993, contempla de forma indirecta factores de seguridad para evitar fallas por fatiga, deformación permanente y agrietamientos por bajas temperaturas.

BIBLIOGRAFÍA

AASHTO,
Guía para el Diseño de estructuras de pavimento, 1,993

American Concrete Institute
A Selection of Historic american papers on concrete, 1,976

Instituto Colombiano de Productores de Cemento,
Pavimentos de concreto; Manual de diseño, 1,975

Londoño, Cipriano
Diseño, Construcción y Mantenimiento de Pavimentos de concreto, 2,001

Secretaría de Integración Económica Centroamericana, SIECA
Acuerdo Centroamericano sobre Circulación por Carreteras, 2,001

Secretaría de Integración Económica Centroamericana, SIECA
Manual Centroamericano de Mantenimiento de Carreteras, 2,001

Secretaría de Integración Económica Centroamericana, SIECA
Manual Centroamericano de Especificaciones para la Construcción de Carreteras y Puentes Regionales, 2,001

Secretaría de Integración Económica Centroamericana, SIECA
Manual Centroamericano de Normas para el Diseño Geométrico de las Carreteras Regionales, 2,001

Coronado Iturbide, Jorge, Secretaría de Integración Económica Centroamericana, SIECA
Dictamen Regional, 2,001

Ingenieros Consultores de Centro América
Especificaciones Generales para la Construcción de Carreteras y Puentes, 2,001

Instituto del asfalto
Guía para el diseño de Espesores, (MS-1), 1,991

Universidad Nacional de San Juan, Argentina
Guía para el diseño de Pavimentos, 1,994

Harris, INC, Frederic R.
Diseño de Espesores y recomendaciones generales para la construcción de nuevos pavimentos utilizando adoquines, 2,002